

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO HENRIQUE RIBEIRO

ADIÇÃO, ESTOQUE E LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM
FUNÇÃO DE ALTURAS DE PASTEJO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

CURITIBA

2019

RICARDO HENRIQUE RIBEIRO

ADIÇÃO, ESTOQUE E LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM
FUNÇÃO DE ALTURAS DE PASTEJO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Coorientador: Prof. Dr. Jonatas Thiago Piva

CURITIBA

2019

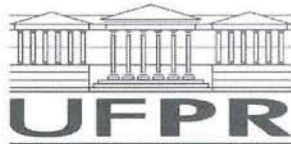
R484a Ribeiro, Ricardo Henrique
 Adição, estoque e labilidade de carbono e nitrogênio no solo em
 função de alturas de pastejo sob integração lavoura-pecuária /
 Ricardo Henrique Ribeiro. - Curitiba, 2019.
 81 p.: il.,

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor
 de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciências
 do Solo.
 Orientador: Jeferson Dieckow
 Coorientador: Jonatas Thiago Piva

 1. Solos - teor de nitrogênio. 2. Solos - teor de carbono. 3.
 Sistemas agrícolas. 4. Pastagem. 5. Sequestro de carbono. I.
 Dieckow, Jeferson (Orientador). II. Piva, Jonatas Thiago
 (Orientador). III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.417.4

Sistema de Bibliotecas/UFPR, Biblioteca de Ciências Agrárias
Paula Carina de Araújo - CRB9/1562



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **RICARDO HENRIQUE RIBEIRO** intitulada: **Adição, estoque e labilidade de carbono e nitrogênio no solo em função de alturas de pastejo sob integração lavoura-pecuária**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 19 de Fevereiro de 2019.

JEFERSON DIECKOW

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

JONATAS THIAGO PIVA

Coorientador - Avaliador Externo (UFSC)

FABIANE MACHADO VEZZANI

Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à toda minha família, em especial meus pais pelo exemplo, incentivo, apoio e confiança.

À todos os professores do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo e demais servidores da Universidade Federal do Paraná pela competência e por terem participado efetivamente nessa conquista. Em especial ao meu orientador prof. Dr. Jeferson Dieckow pela amizade e ensinamentos. Seus ensinamentos ficarão para sempre guardados.

À meu co-orientador Jonatas Thiago Piva pela disponibilização da aérea para o presente estudo, além da amizade e ensinamentos. Foi uma imensa satisfação a realização desse trabalho.

À minha namorada e sempre companheira Mariana Alves Ibarra que sempre me apoiou e incentivou. Você me enche de orgulho e alegrias, te amarei para sempre!

Aos parceiros de grupo de pesquisa Bruna, Carol, Ezequias, Felix, Giovanna, João, Kellin, Mariana, Michele e Priscila por auxiliarem nas atividades e pela troca de ideias.

Ao Grupo de Pesquisa em Manejo e Fertilidade do Solo da UFSC – Curitiba, em especial ao Brancalione, Elisandra, Felipe, Guilherme e Jorge, pela ajuda na condução do experimento e coletas.

Aos colegas pela amizade e por todos os momentos compartilhados. Em especial ao Marcos e Wilian que sempre estiveram dispostos a conversar, discutir e dar ideias sobre a ciência.

A todos vocês meu muito obrigado!

RESUMO

A integração lavoura-pecuária (ILP) é um sistema de manejo constituído pela alternância entre culturas de grãos e pastagens na mesma área ao longo do ano. Nestes sistemas a presença do componente animal traz melhorias para o solo no âmbito físico, químico e biológico, favorecendo o desenvolvimento das culturas cultivadas em sucessão. Aliado à isso, os sistemas ILP podem aumentar o sequestro de carbono e nitrogênio no solo principalmente através do desenvolvimento das raízes das pastagens. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de alturas de pastejo associado à doses de nitrogênio nas adições de carbono e nitrogênio pelas plantas e seu estoque e labilidade no solo. O experimento foi conduzido numa área de ILP, sobre um Cambissolo háplico Tb distrófico latossólico, manejada em alturas de pastejo (15 cm, 7 cm e sem pastejo) e doses de nitrogênio (0, 75 e 150 kg N ha⁻¹) aplicadas em cobertura na pastagem da aveia preta no perfilhamento. O pastejo foi conduzido de forma rotacional com o primeiro ciclo iniciado quando as plantas atingiam 30 cm de altura. Os animais ficavam nos piquetes até as plantas atingirem a altura dos respectivos tratamentos e um novo ciclo de pastejo iniciava quando as plantas estavam com 30 cm novamente. Para o pastejo foram utilizados bovinos (bois e novilhas) cruzados com aproximadamente 1,5 anos de idade. Os resultados dos primeiros anos de experimento mostraram que o pastejo à 15 cm reduziu a adição total de carbono e nitrogênio da aveia preta ao solo, em comparação ao sistema não pastejado, porém não reduziu a adição na forma de raízes, que é o principal contribuinte na formação de matéria orgânica no solo. O sistema pastejado à 7 cm de altura reduziu as adições de parte aérea e raízes em alguns casos, em comparação ao 15 cm. Por outro lado os sistemas não afetaram a adição anual de carbono, considerando a cultura de grãos. Dessa forma não houveram diferenças nos estoques de carbono e nitrogênio do solo (198,6 e 15,3 Mg ha⁻¹, respectivamente, camada 0-100 cm), porém o pastejo à 7 cm reduziu a labilidade da matéria orgânica. A adubação nitrogenada aumentou as adições de carbono e nitrogênio pela parte aérea da planta e consequentemente aumentou a labilidade da matéria orgânica, porém sem efeitos nos estoques de carbono e nitrogênio do solo. No curto prazo de condução do presente experimento a pastagem de aveia preta pastejada à 15 cm de altura e associada à adubação nitrogenada de 75 ou 150 kg N ha⁻¹ no inverno, é eficiente em adicionar carbono e nitrogênio para manter os estoques e a qualidade da matéria orgânica no sistema de integração lavoura-pecuária.

Palavras-chave: Matéria orgânica do solo. Intensidade de pastejo. Sequestro de carbono. Nitrogênio. Sistemas integrados.

ABSTRACT

Integrated crop-livestock system (ICL) is a management system constituted by the alternation among grain crops and pastures in the same area throughout the year. In these systems the presence of the animal cause improvements in soil physical, chemical and biological process, fostering the development of crops grown in succession. In addition, ICL systems can increase soil carbon and nitrogen sequestration mainly through the development of pasture roots. In this sense, the aim of this study was to evaluate the effect of grazing heights associated with nitrogen rates on carbon and nitrogen additions by plants and their stock and lability in soil. The experiment was conducted in an ICL area over a Cambissol, managed under grazing heights (15 cm, 7 cm and no grazing) and nitrogen rates (0, 75 and 150 kg N ha⁻¹), applied in topdressing to black oat pasture tillering. Was utilized a rotational grazing with the first cycle started when plants reached 30 cm in height. The animals stayed in the plots until plants reached the height of the respective treatments and new grazing cycle began when plants were 30 cm higher again. For grazing, were used cross-breed cattle (heifer and calf) with 1.5 years. The results of the first years of the experiment indicated that grazing at 15 cm reduced total carbon and nitrogen black oat addition to soil, compared to no-grazed system, however addition by roots, which are the main contributor in soil organic matter formation, were not reduced. The grazed system at 7 cm height reduced black oat shoot additions and roots in some cases, compared to 15 cm. On the other hand, the systems did not affect the annual carbon addition, considering the grain crops. Thus, there were no differences in soil carbon and nitrogen stocks (198.6 and 15.3 Mg ha⁻¹, respectively, 0-100 cm layer), but grazing at 7 cm reduced soil organic matter lability. Nitrogen fertilization increased carbon and nitrogen additions by plant shoot and consequently, increased the lability of organic matter, but with no effects on soil carbon and nitrogen stocks. In the short term of experimentation the black oat pasture grazed at 15 cm height associated with nitrogen fertilization of 75 or 150 kg N ha⁻¹ during winter, is efficient in adding carbon and nitrogen to maintain the stocks and the quality of the organic matter in integrated crop-livestock system.

Keywords: Soil organic matter. Grazing intensity. Carbon sequestration. Nitrogen. Integrated systems.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	9
2 CAPÍTULO I: ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA SUBMETIDO À INTENSIDADES DE PASTEJO E ADUBAÇÃO NITROGENADA.....	12
2.1 RESUMO.....	12
2.2 ABSTRACT	13
2.3 INTRODUÇÃO	14
2.4 MATERIAL E MÉTODOS	15
2.4.1 EXPERIMENTO DE CAMPO	15
2.4.2 ADIÇÃO DE BIOMASSA, CARBONO E NITROGÊNIO PELA AVEIA PRETA	18
2.4.3 ADIÇÃO DE BIOMASSA E CARBONO PELO MILHO E SOJA	20
2.4.4 INFORMAÇÕES METEOROLÓGICAS.....	20
2.4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	20
2.5 RESULTADOS	21
2.5.1 ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO POR RAÍZES.....	21
2.5.2 ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO PELA PARTE AÉREA	27
2.5.3 ADIÇÃO TOTAL DE CARBONO E NITROGÊNIO PELA PLANTA.....	33
2.5.4 RAZÃO PARTE AÉREA:RAIZ.....	33
2.5.5 ADIÇÃO DE CARBONO PELAS CULTURAS DE GRÃOS.....	34
2.5.6 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS	35
2.6 DISCUSSÃO	37
2.6.1 ALTERAÇÕES PELO PASTEJO NA ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO	37
2.6.2 ALTERAÇÕES NA ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO PELA ADUBAÇÃO NITROGENADA	39
2.6.3 EFEITO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NA ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO.....	40
2.6.4 SISTEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS NO VERÃO EM ILP COMO ALTERNATIVA AO AUMENTO DAS ADIÇÕES DE CARBONO	40
2.7 CONCLUSÕES	41
2.8 REFERÊNCIAS.....	42

3 CAPÍTULO II: ESTOQUE E LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM FUNÇÃO DE ALTURAS DE PASTEJO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA.....	48
3.1 RESUMO.....	48
3.2 ABSTRACT	49
3.3 INTRODUÇÃO	50
3.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	51
3.4.1 EXPERIMENTO DE CAMPO	51
3.4.2 ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO E SUA LABILIDADE	52
3.4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	55
3.5 RESULTADOS	55
3.5.1 ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO	55
3.5.2 LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO	59
3.6 DISCUSSÃO	62
3.6.1 EFEITO DO PASTEJO NOS ESTOQUES E LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO	62
3.6.2 EFEITOS DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NOS ESTOQUES E LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO	63
3.7 CONCLUSÕES	64
3.8 REFERÊNCIAS.....	65
4 CONCLUSÃO GERAL.....	70
5 REFERÊNCIAS.....	71
APÊNDICE 1 –CLASSIFICAÇÃO DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	80
APÊNDICE 2 - NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DE CURITIBANOS-SC.	81

1 INTRODUÇÃO GERAL

Mundialmente, cerca 25% das emissões totais de gases do efeito estufa (GEE) são provenientes do uso e mudança do uso da terra, sendo que 10-14% são oriundos da produção agrícola, principalmente pelas emissões do solo e manejo animal; e outros 12-17% da mudança de uso da terra (IPCC, 2014). O solo é o principal reservatório terrestre de carbono no planeta, dessa forma é crucial para os processos de sequestro de dióxido de carbono atmosférico (CO₂) nos ecossistemas terrestres (LAL et al., 2007).

O sequestro de CO₂ pelo solo é mediado principalmente pelas plantas, as quais absorvem o gás e o transformam em carbono orgânico em seus componentes celulares. O carbono fixado pelas plantas é aportado ao solo pela liberação de exsudatos e pela senescência da parte aérea e raízes (LAL, 2004). Ao serem depositados no solo, os resíduos vegetais são submetidos aos processos de degradação física e química pelos organismos edáficos, tornando-se matéria orgânica do solo (MOS) (LEHMANN; KLEBER, 2015). Enquanto a maioria do carbono é mineralizada pelos microrganismos e respirada para a atmosfera em curto tempo, uma porção cicla lentamente no solo, incrementando a MOS. Sendo assim, o potencial do solo em sequestrar CO₂ atmosférico é refletido no aumento do teor de matéria orgânica, e consequentemente, no aumento do estoque de carbono do solo (POEPLAU et al., 2016).

No que diz respeito ao manejo do solo, práticas conservacionistas, como o plantio direto, aumentam a quantidade de resíduos aportados ao solo, bem como reduzem as taxas de decomposição da MOS (DIEKOW et al., 2005; BAYER et al., 2006), dessa forma mitigando as emissões de GEE (LAL et al., 2011). O plantio direto é capaz de sequestrar 0,6 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, em relação ao preparo convencional (TIVET et al., 2013), situação essa que compara dois sistemas de manejo muito contrastantes. Porém, um plantio direto com práticas de manejo melhoradoras do solo, como por exemplo a diversificação de culturas, é capaz de elevar seu potencial de sequestro em mais 0,34 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (ZANATTA et al., 2007). Tais dados evidenciam que o plantio direto por si só não é capaz de explorar o total potencial do solo em sequestrar C e nitrogênio, visto que a adição, principalmente por raízes é baixa (ALBURQUERQUE et al., 2015).

Nesse sentido, surgem os sistemas integrados de produção agropecuária, com destaque à integração lavoura-pecuária (ILP), sendo o principal sistema utilizado na região sul do Brasil, constituído pela alternância entre pastagens no inverno com culturas de grãos no verão (CARVALHO et al., 2010). Sua principal característica está na quantidade e diversidade de resíduo que retorna ao solo (SOUZA et al., 2008; CARVALHO et al., 2010), principalmente na forma de raízes. Nesses sistemas, o pastejo estimula o crescimento de raízes através da constante renovação de parte aérea e perfilhamento da pastagem (SOUZA et al., 2008; ANGHINONI et al., 2013; LARREGUY et al., 2017), assim uma maior quantidade de carbono oriundo de raízes é adicionada ao solo, inclusive em profundidade, em relação a um sistema não pastejado (NICOLOSO et al., 2008; SANTOS et al., 2011).

De acordo com Assmann et al. (2014), o uso de ILP com intensidade de pastejo moderada, resultou em sequestro de $0,8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, porém quando manejado em alta intensidade o sequestro foi praticamente nulo. Os mesmos autores concluem que o pastejo de alta intensidade não representa um manejo sustentável à longo prazo e tal fato é relacionado à baixa adição de resíduos. Dessa forma, dependendo da intensidade de pastejo o sistema radicular e a parte aérea da planta serão diretamente afetados (ZHOU et al., 2017), definindo a quantidade de resíduo (parte aérea + raiz) ao final do pastejo, a qual contribuirá com o sequestro de carbono e nitrogênio no ILP.

Todavia, são os resíduos radiculares que apresentam maior contribuição na formação de MOS estável, pois contrariamente ao resíduo de parte aérea que é rapidamente mineralizado, o resíduo de raiz tem maior tempo de residência no solo (RASSE et al., 2005; KÄTTERER et al., 2011; BOLINDER et al., 2012). Segundo Rasse et al. (2005), a maior recalcitrância química e a maior proteção física das raízes contra a atividade microbológica, são os principais fatores responsáveis por essa diferenciação em relação aos resíduos de parte aérea. Além disso, durante o desenvolvimento radicular são exsudados compostos de baixo peso molecular os quais são responsáveis pela estabilização da MOS através de interações organo-minerais (PAUSCH; KUZUYAKOV, 2017; SOKOL et al., 2018). Nesse sentido, uma prática de manejo da pastagem em ILP que promova aumento na adição de carbono e nitrogênio via raízes promoverá incrementos na MOS e na sua estabilização à longo prazo.

Sendo assim o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar o efeito da intensidade de pastejo e da dose de nitrogênio sob as adições de carbono e nitrogênio via planta, sua influência no estoque de carbono e nitrogênio no solo e estabilidade da MOS num sistema de integração lavoura-pecuária.

2 CAPÍTULO I: ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SISTEMA DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA SUBMETIDO À INTENSIDADES DE PASTEJO E ADUBAÇÃO NITROGENADA

2.1 RESUMO

A adição de resíduos de plantas é fundamental para manter os estoques de carbono e nitrogênio no solo. Nesse sentido, os sistemas de integração lavoura-pecuária (ILP) destacam-se devido à elevada adição de resíduos, principalmente na forma de raízes. O objetivo do presente estudo foi avaliar as adições de carbono e nitrogênio pelas culturas num ILP manejado com diferentes alturas de pastejo e doses de nitrogênio. Foram avaliadas as alturas de pastejo de 15 e 7 cm além de um tratamento sem pastejo, com aplicação de 0, 75 e 150 kg N ha⁻¹ em cobertura na pastagem de aveia preta. O pastejo foi conduzido de forma rotacional com entrada dos animais na pastagem à 30 cm de altura e saída nas respectivas alturas de cada tratamento. Os resultados mostram que o pastejo à 15 cm não alterou a adição de carbono e nitrogênio pelas raízes da aveia preta e manteve a adição em níveis similares ao sem pastejo. No entanto, houve redução média de 45% na adição de carbono e nitrogênio pela parte aérea da aveia preta no sistema pastejado à 15 cm, em comparação ao sem pastejo. Quando o pastejo foi realizado à 7 cm de altura e com 150 kg N ha⁻¹ em condição climática normal, houve redução nas adições de parte aérea e de raiz em comparação ao 15 cm. Os efeitos das doses de nitrogênio aplicadas não afetaram as adições de carbono e nitrogênio por raízes, porém incrementaram as adições de parte aérea da aveia preta. As adições de carbono pelas culturas de grãos não foram afetadas pelo manejo da pastagem, dessa forma a adição média anual do sistema (aveia preta + cultura de verão) foi 5,26 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ durante as duas safras avaliadas. O pastejo à 15 cm de altura associado à adubação nitrogenada mostrou-se como a melhor opção para manter as adições de carbono e nitrogênio ao solo pelo sistema de integração lavoura-pecuária.

Palavras-chave: Biomassa radicular. Alocação de carbono. Relação C/N. Conservação do solo. Integração lavoura-pecuária.

2.2 ABSTRACT

The addition of plant residues is crucial to maintain carbon and nitrogen stocks in soil. For that matter, integrated crop-livestock systems (ICL) stand out due to high amount of residues addition, mainly in the form of roots. The aim of the present study was to evaluate carbon and nitrogen additions by crops in an ICL managed with different grazing heights and nitrogen rates. Were evaluated the grazing heights of 15 and 7 cm and also a no grazing treatment, with application of 0, 75 and 150 kg N ha⁻¹ on topdressing of the black oat pasture. Was used a rotational grazing with animal entry when pasture height was 30 cm, and left when achieving the respective treatments heights. The results showed that grazing at 15 cm do not modified the carbon and nitrogen addition by black oat roots and maintained the addition at levels similar to that no grazing area. However, grazing at 15 cm reduced in 45% the addition of carbon and nitrogen by black oats shoots, compared to no grazing. When plants were grazed at 7 cm and with application of 150 kg N ha⁻¹ in normal climatic conditions, shoot and root carbon and nitrogen addition were reduced compared to 15 cm. Nitrogen rate do not modified the additions of carbon and nitrogen by roots, but increased the additions of black oat shoot. Carbon additions by grain crops were not affected by pasture management, resulting in a mean annual addition in the system (black oat + grain crops) about 5.26 Mg C ha⁻¹ year⁻¹ along the two growing seasons evaluated. Grazing at 15 cm height associated with nitrogen fertilization proved effective to maintain carbon and nitrogen additions to soil by the integrated crop-livestock system.

Keywords: Root biomass. Carbon allocation. C:N ratio. Soil conservation. Crop-livestock system.

2.3 INTRODUÇÃO

Na agricultura sob plantio direto, a conservação de cobertura do solo permanente e a adição de resíduos orgânicos em níveis suficientes para manutenção dos estoques de matéria orgânica do solo (MOS), tem sido alguns dos principais desafios para o sucesso dessa prática conservacionista (AMADO et al., 2006). Nesse sentido, as plantas desempenham papel fundamental na dinâmica da MOS, seja pela ação direta em adicionar carbono pela palhada, por raízes ou por exsudação radicular (KÄTTERER et al., 2011; BOLINDER et al., 2012) ou pela ação indireta através da estabilização da MOS e proteção do solo contra erosão (DIGNAC et al., 2017). De acordo com Bayer et al. (2006), em áreas de plantio direto em regiões subtropicais devem ser adicionados $3,92 \pm 1,30 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (parte aérea + raízes) somente para manter os estoques de carbono do solo. Dessa forma, um sistema caracterizado pela alta produção e adição de resíduos pode maximizar os efeitos do plantio direto em sequestrar carbono atmosférico (LAL et al., 2011).

As pastagens são exemplos de sistemas com alta adição de resíduos, sendo eficientes no sequestro de carbono no solo, pois o pastejo pelos animais estimula a maior produção de raízes, acelerando seu *turnover* em comparação a sistemas não pastejados (SOUZA et al., 2008). Por sua vez, as culturas destinadas a grãos ou como adubação verde, adicionam maior quantidade de resíduos via parte aérea, que acumulam na superfície do solo (CONCEIÇÃO et al., 2013). Sendo assim, a utilização de um sistema de integração lavoura-pecuária (ILP), favorece o sequestro de carbono no solo, devido às adições de carbono pelas raízes da pastagem (SOUZA et al., 2008; SANTOS et al., 2011), bem como evita perdas por erosão, devido às adições de parte aérea pelos resíduos das culturas de grãos (VELOSO et al., 2018), aumentando o potencial de sequestro de carbono em relação a sistemas não integrados.

Em um sistema de ILP, o manejo da pastagem é de fundamental importância para manutenção da qualidade e funcionalidade do sistema (CARVALHO et al., 2010). Tal fato é decorrente principalmente da quantidade de biomassa que é deixada após o período do pastejo (SILVA et al., 2014). Assim, a intensidade de pastejo tem relevante influência, pois define o quanto é removido pelos animais e consequentemente, a quantidade de biomassa residual (CARVALHO et al., 2018) e a quantidade de biomassa radicular (CHEN et al., 2015; ZHOU et al., 2017). Em

sistemas mal conduzidos (excesso de pastejo) a maior remoção de parte aérea reduz o crescimento radicular, devido à translocação de fotoassimilados para promover o rebrote da planta (CHEN et al., 2015), diminuindo os estoques de carbono do solo a longo prazo.

Além do manejo da intensidade de pastejo, a adição de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, é outra forma de promover maior produção e estabilidade das pastagens (POEPLAU et al., 2018). A maior produtividade das pastagens aumenta a quantidade de carbono e nitrogênio adicionado ao sistema tanto pela planta, quanto pelos dejetos dos animais em superfície (SCHIPPER et al., 2017). Nesse sentido, a adubação nitrogenada é de fundamental importância em pastagens, principalmente em sistemas de ILP (SILVEIRA et al., 2012).

Sendo assim, a hipótese deste trabalho é que o pastejo à uma altura de 15 cm (moderada), associado ao aumento da dose de nitrogênio aplicada, em comparação ao pastejo intensivo (7 cm) ou à ausência de pastejo, aumentam as adições de carbono e nitrogênio no solo via planta (parte aérea + raízes). Para testar esta hipótese, os objetivos do presente estudo foram: i) avaliar o efeito da altura de pastejo e dose de nitrogênio em cobertura, em pastagem de aveia preta, sobre as adições de carbono e nitrogênio ao solo pela parte aérea e raízes; ii) avaliar o efeito da altura de pastejo nas adições de carbono pelas culturas de verão, e comparar a adição média anual de carbono em relação às adições mínimas sugeridas por Bayer et al. (2006).

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

2.4.1 EXPERIMENTO DE CAMPO

O estudo foi conduzido num experimento de campo instalado na Fazenda Experimental do Campus Curitibanos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no município de Curitibanos – SC (27°16'26.55" S, 50°30'14.41" W, 1000 m de altitude). O clima é subtropical (Cfb, Köppen) (ALVARES et al., 2013), com temperatura média de 11,6 °C no mês mais frio (julho) e 20,8 °C no mês mais quente (janeiro), e precipitação média anual de 1500 mm (WREGE et al., 2012). O solo do experimento foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico latossólico, com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et

al., 2018) (APÊNDICE 1). Informações sobre granulometria e algumas características químicas da camada de 0-20 cm do solo constam na TABELA 1.

TABELA 1- GRANULOMETRIA E CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO SOLO (0-20 cm) DA ÁREA EXPERIMENTAL. CURITIBANOS-SC.

Característica	Valor
Argila ^a (g dm ⁻³)	663
Silte ^a (g dm ⁻³)	231
Areia ^a (g dm ⁻³)	106
pH CaCl ₂	4,6
Alumínio ^b (cmol _c dm ⁻³)	0,3
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	7,9
Cálcio ^b (cmol _c dm ⁻³)	2,4
Magnésio ^b (cmol _c dm ⁻³)	2,0
Potássio ^c (cmol _c dm ⁻³)	0,1
Soma de bases (cmol _c dm ⁻³)	4,5
CTC efetiva	4,7
CTC pH 7,0	12,3
Saturação de bases (%)	36,1
Saturação por alumínio (%)	6,7
Fósforo ^c (mg dm ⁻³)	3,8
Carbono ^d (g dm ⁻³)	30,4

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: ^a Granulometria pelo método do densímetro de Bouyoucos; ^b Extrator KCl (1,0 mol L⁻¹); ^c Extrator Melich-1; ^d Oxidação por dicromato de potássio e ácido sulfúrico.

A vegetação nativa do local é floresta ombrófila mista que em 1980 foi substituída por cultivo comercial de pinus (*Pinus* sp.). Em 2009, o pinus foi colhido e a área mantida em pousio até 2013, quando o solo foi preparado com grade pesada para o cultivo com a sucessão braquiária (*Urochloa* sp.) - milho (*Zea mays* L.) no mesmo ano e com a sucessão braquiária - soja (*Glycine max* L. Merrill) no ano seguinte. Em 2015, a área foi cultivada com triticales (*×Triticosecale* Wittm. ex A. Camus [*Secale × Triticum*]) para pastejo no inverno, após a aplicação de 3,5 Mg ha⁻¹ de calcário, e com feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no verão. Durante o período prévio à instalação do experimento foi aportado grande quantidade de resíduo das plantas, resultando uma boa condição inicial de solo.

O experimento foi instalado em maio de 2016 e o presente estudo foi conduzido no segundo ano (2017) e no terceiro ano (2018) do experimento. O sistema de uso do solo foi integração lavoura-pecuária, com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) para pastagem no inverno; e milho, soja e feijão para grãos no verão do primeiro, segundo e terceiro ano, respectivamente.

Os tratamentos constituíram de três alturas de pastejo da aveia preta (sem pastejo, 15 cm e 7 cm) e de três doses de nitrogênio aplicados em cobertura na

aveia preta (0, 75 e 150 kg N ha⁻¹), arranjos num fatorial 3 × 3, em blocos ao acaso e com quatro repetições. O tratamento sem pastejo foi uma testemunha como planta de cobertura do solo no inverno; a altura de 15 cm representou um pastejo moderado, comumente utilizado na região; e a altura de 7 cm representou um pastejo intensivo. As parcelas, cercadas com cerca elétrica de dois fios, mediam 14 × 16 m (224 m²), exceto as sem pastejo, que mediam 10 × 5 m (50 m²).

Em maio de cada ano, a aveia preta cultivar IAPAR 61 era semeada com uma semeadora-adubadora, na dose de 80 kg semente ha⁻¹ e com espaçamento entrelinhas de 17 cm. A adubação de base foi 54 kg P₂O₅ ha⁻¹ e 54 kg K₂O ha⁻¹ (300 kg ha⁻¹ do formulado 0-18-18). As doses de nitrogênio em cobertura dos tratamentos foram aplicadas durante o estágio de perfilhamento da aveia preta, na forma de ureia (45 % de N).

O pastejo da aveia preta por bois ou novilhas com aproximadamente 180 kg de peso vivo predominantemente das raças Charolês e Holandês foi conduzido de forma rotacional, com o primeiro ciclo de pastejo iniciando 15-20 dias após adubação nitrogenada de cobertura, quando as plantas atingiam 30 cm de altura. Cada ciclo de pastejo durava 1-2 dias, com 4-6 animais por parcela, até as plantas serem rebaixadas à altura de 7 cm ou 15 cm, dependendo do tratamento. Novo ciclo de pastejo iniciava quando a altura de plantas atingia novamente 30 cm e entre um ciclo e outro os animais permaneciam numa área de refúgio adjacente. Para identificar os momentos de entrada e de saída dos animais das parcelas, a altura média das plantas era medida com régua “sward stick”, em 40 pontos aleatórios por parcela. Geralmente ocorriam dois ciclos de pastejo por inverno, mas ocorreu somente um com a dose 0 kg N ha⁻¹ em 2017, e ocorreram três com as doses 75 e 150 kg N ha⁻¹ em 2018. O último ciclo de pastejo geralmente ocorria no final de setembro ou início de outubro, no início do florescimento da aveia preta. Após o último pastejo, tanto a aveia preta pastejada como a não pastejada, que também se encontrava em florescimento, eram dessecadas com herbicida glifosate (4 L ha⁻¹).

A semeadura da cultura de verão era realizada cerca de 20-30 dias após a dessecção da aveia preta. Em 2016, o milho híbrido 30F53YHR foi semeado em outubro, num espaçamento de 0,8 m entrelinhas e numa densidade de 85 mil sementes ha⁻¹. A adubação de base foi 54 kg P₂O₅ ha⁻¹ e 54 kg K₂O ha⁻¹ (300 kg ha⁻¹ do formulado 0-18-18), e a adubação de cobertura no estágio V4 da cultura foi 150 kg de N-ureia ha⁻¹ aplicados a lanço. Em 2017, a soja cultivar NS6909 foi semeada

em outubro, num espaçamento de 0,45 m entrelinhas e numa densidade de 355 mil sementes ha⁻¹. A adubação de base da soja foi 6 kg N ha⁻¹, 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ e 60 kg K₂O ha⁻¹ (300 kg ha⁻¹ do formulado 02-20-20). O manejo de pragas e doenças era realizado de acordo com as recomendações técnicas das culturas.

2.4.2 ADIÇÃO DE BIOMASSA, CARBONO E NITROGÊNIO PELA AVEIA PRETA

A biomassa da parte aérea e de raízes da aveia preta foi avaliada em dois anos: 2017 (Ano 1) e 2018 (Ano 2).

A parte aérea foi avaliada imediatamente antes de cada ciclo de pastejo (biomassa pré pastejo) e imediatamente após (biomassa pós pastejo), sendo a diferença entre ambas a biomassa pastejada. Em cada avaliação, a parte aérea da aveia preta foi coletada em três pontos amostrais de 0,25 m² (0,50 × 0,50 m) por parcela, sendo as plantas cortadas à superfície do solo. A biomassa dos três pontos foi juntada numa amostra composta e pesada para determinação da massa fresca. Uma alíquota foi seca a 45 °C para correção da umidade e quantificação da massa seca, e armazenada para análises. A biomassa pós pastejo do último ciclo de pastejo foi considerada também como biomassa residual.

A biomassa total de parte aérea foi obtida pelo somatório das biomassas pastejadas ao longo dos ciclos de pastejo mais a biomassa residual, conforme equação abaixo.

$$\text{Biomassa total de parte aérea} = \sum_{i=1}^n \text{Biomassa pastejada} + \text{Biomassa residual}$$

A biomassa de raízes de aveia preta foi avaliada 15-17 dias após o último pastejo. Amostras foram coletadas com um trado para raízes (SCHUURMAN; GOEDEWAAGEN, 1971), de 8 cm de diâmetro interno e 10 cm de altura, com borda inferior serrilhada para o corte do solo e raízes. As raízes foram coletadas nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm de solo, em dois pontos amostrais próximos de pontos da última amostragem de parte aérea. Em cada ponto amostral de raiz foi obtida uma amostra composta para cada camada, a partir de duas subamostras, uma coletada na linha e de outra na entrelinha de aveia preta.

Imediatamente após a coleta, as amostras de raízes mais solo foram congeladas, assim permanecendo por 2-8 meses, até serem processadas. As amostras foram descongeladas por 12 horas e posteriormente desagregadas manualmente. Com auxílio de água corrente o solo foi disperso e as raízes foram lavadas sobre conjunto de peneiras (1,0 e 0,5 mm). As peneiras foram lavadas com água corrente sobre uma bandeja para remoção das raízes, o sobrenadante foi passado em filtro para escoar a água. As raízes retidas no filtro foram removidas manualmente com auxílio de pinças e transferidas para frascos contendo solução de etanol 70 % até o momento da análise. As amostras de raízes foram secas a 45 °C e então a biomassa de raízes foi quantificada e armazenada para análises.

Amostras da biomassa de parte aérea e de raízes foram trituradas e posteriormente moídas em moinho de bolas até passar peneira de malha de 250 µm. Uma alíquota de ~15 mg foi pesada para determinação dos teores de carbono e nitrogênio totais, através do método de combustão seca em analisador elementar Vario EL III. A fim de reduzir o custo das determinações de carbono e nitrogênio associado ao elevado número de amostras de parte aérea, as amostras de pré pastejo dos diferentes ciclos de pastejo e das quatro repetições foram unidas numa única amostra composta que representou os teores de carbono e nitrogênio da biomassa pastejada. O mesmo procedimento foi realizado para as amostras de pós pastejo do último ciclo de pastejo, referindo-se aos teores de carbono e nitrogênio da biomassa residual.

Para a estimativa das adições totais de carbono e nitrogênio ao solo, foi considerada a biomassa pastejada, residual e de raízes; e seus respectivos teores de carbono e nitrogênio. No caso da biomassa pastejada, a adição efetiva de carbono e nitrogênio ao solo foi somente via biomassa de esterco, estimada como sendo 0,2785 vezes a biomassa pastejada, considerando uma digestibilidade de 72,15% para bovinos e aveia preta (LONG et al., 2004; MIGUEL et al., 2012; FUKUSHIMA et al., 2015; STERGIADIS et al., 2016). No caso de adição de carbono e nitrogênio por raízes, foi incluída também a adição por rizodeposição, estimada como sendo equivalente a 0,65 vezes a adição via biomassa de raízes (BOLINDER et al., 2007). Assim, a adição de carbono e nitrogênio via raízes foi a adição pela biomassa medida mais a adição pela rizodeposição.

2.4.3 ADIÇÃO DE BIOMASSA E CARBONO PELO MILHO E SOJA

A produção de biomassa de parte aérea da cultura do milho e da soja foi estimada a partir da sua produtividade através dos índices de colheita propostos por Pierri et al. (2016), os quais são 0,49 para o milho e 0,52 para soja. Assim, convertendo o índice de colheita por um fator de conversão de rendimento de grãos para quantidade de biomassa produzida, temos o valor de 1,04 para o milho e 0,92 para soja. Dessa forma, a produtividade de cada cultura foi multiplicada pelo respectivo fator obtendo a biomassa de parte aérea. Além disso, foi considerado a biomassa de raízes como sendo 30% da biomassa de parte aérea (ZANATTA et al., 2007). A biomassa total das culturas de verão foi obtida pela soma entre biomassa de parte aérea e biomassa de raiz.

Considerando um teor médio de 400 g C kg⁻¹ para o resíduo das culturas (ZANATTA et al., 2007), e sua biomassa total, foi calculado a adição de carbono durante a fase verão. Para avaliação da adição do sistema como um todo, a adição de carbono pela aveia preta foi somada à adição pelas culturas de verão até então cultivadas na área (milho e soja), dessa forma obtendo-se o valor de adição anual pelo sistema de integração lavoura-pecuária.

2.4.4 INFORMAÇÕES METEOROLÓGICAS

Dados de temperatura média diária do ar e de precipitação pluviométrica diária durante os dois ciclos de cultivo de aveia preta foram obtidos numa estação meteorológica localizada no campus da UFSC, cerca de 4 km do experimento.

2.4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados de biomassa total de parte aérea, pastejada, residual, e de raízes, bem como seus teores e adições de carbono e nitrogênio, além da adição de carbono pelas culturas de verão, foram submetidos à análise de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (Bartlett), seguido de análise de variância (ANOVA). Quando constatado efeito significativo ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

2.5 RESULTADOS

2.5.1 ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO POR RAÍZES

A biomassa de raiz não foi afetada significativamente pelo pastejo à 15 cm em relação ao sem pastejo (TABELA 2), com comportamento similar em ambos os anos, resultando em biomassa média de $1,49 \text{ Mg ha}^{-1}$. Exceções ocorreram no ano 1 e na ausência de adubação nitrogenada em que a aveia preta pastejada à 15 cm produziu $1,33 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomassa de raízes na camada 0-30 cm, sendo 12% superior ao sem pastejo. Ao comparar as alturas de pastejo não houveram diferenças significativas, porém no ano 2 e na dose de 150 kg N ha^{-1} , o pastejo à 15 cm foi 19% superior ao 7 cm (camada 0-30 cm).

De maneira geral, a adubação nitrogenada também não afetou a biomassa radicular da aveia preta (TABELA 2). No entanto, no ano 1 e na camada de 0-5 cm, com o aumento da dose aplicada, maior biomassa radicular foi produzida em todos os tratamentos. Enquanto isso, no ano 2 os efeitos da adubação nitrogenada se concentraram no pastejo à 7 cm, em que o aumento da dose aplicada reduziu a biomassa radicular (camada 0-30 cm) de $1,63 \text{ Mg ha}^{-1}$, na ausência de N, para $1,17 \text{ Mg ha}^{-1}$ na dose de 150 kg N ha^{-1} .

O pastejo não afetou os teores de carbono no tecido radicular (TABELA 3), porém elevou as concentrações de nitrogênio em relação ao sem pastejo, mas sem diferenças entre as alturas de pastejo (TABELA 4). Dessa forma, adições de carbono e nitrogênio (camada 0-30) pelas raízes ao solo (TABELA 5 e 6) não foram significativamente afetadas pelo pastejo a 15 cm em relação ao sem pastejo, independente da dose de nitrogênio aplicada e do ano de avaliação. Assim, a adição média de carbono entre sem pastejo e 15 cm foi de $0,78 \text{ Mg ha}^{-1}$, enquanto que a adição de nitrogênio foi 25 kg N ha^{-1} (TABELA 6). No ano 1 não foram observadas diferenças significativas entre as duas alturas de pastejo para adições de carbono e nitrogênio, porém, no ano 2 o pastejo à 7 cm e na dose de 150 kg N ha^{-1} resultou em 18% menor adição de carbono e 21% menor adição de nitrogênio na camada 0-30 cm que o pastejo à 15 cm.

TABELA 3 – TEOR DE CARBONO DE RAÍZES (g C kg⁻¹) DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS OBTIDOS AO FINAL DOS CICLOS DE PASTEJO, EM DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

Camada (cm)	Sem pastejo			15 cm			7 cm											
	0	75	150	0	75	150	0	75	150									
Ano 1																		
0-5	320	Aa	296	Bb	291	Ac	317	Aab	329	Aa	301	Ab	311	Aa	314	ABa	301	Aa
5-10	298	ABb	310	Aa	292	Ab	296	Ba	301	Aa	301	Aa	315	Aa	300	Aab	296	Ab
10-20	319	Aa	297	Bb	301	Ab	314	Aa	315	Aa	299	Aa	307	Aa	307	ABa	299	Aa
20-30	311	Aa	308	Aa	304	Aa	307	ABa	305	Aa	297	Aa	284	Bb	311	Aa	305	Aab
0-30	312	Aa	303	Aab	297	Aa	309	Aa	312	Aa	299	Aa	304	Aa	308	Aa	300	Aa
Ano 2																		
0-5	322	Aa	335	Aa	304	Aa	279	Aa	325	Aa	301	Aa	308	Aa	329	Aa	330	Aa
5-10	283	Aa	291	Aa	300	Aa	302	Aa	298	Aa	312	Aa	303	Aa	303	Aa	317	Aa
10-20	306	Aa	310	Aa	308	Aa	306	Aa	323	Aa	312	Aa	296	Aa	326	Aa	315	Aa
20-30	299	Aa	326	Aa	307	Aa	304	Aa	323	Aa	376	Aa	347	Aa	322	Aa	332	Aa
0-30	303	Aa	315	Aa	305	Aa	298	Aa	317	Aa	325	Aa	313	Aa	320	Aa	324	Aa

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras maiúsculas compararam alturas de pastejo na mesma dose de nitrogênio, enquanto letras minúsculas compararam doses de nitrogênio na mesma altura de pastejo. Teste de Tukey (P<0,05).

TABELA 4 – TEOR DE NITROGÊNIO DE RAÍZES (g N kg⁻¹) DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS OBTIDOS AO FINAL DOS CICLOS DE PASTEJO, EM DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

Camada (cm)	Sem pastejo			15 cm			7 cm											
	0	75	150	0	75	150	0	75	150									
Ano 1																		
0-5	10,8	Ab	9,3	Ba	11,5	Ba	9,4	Ab	12,7	Aa	12,2	Ba	9,7	Ac	12,0	Ab	14,1	Aa
5-10	9,6	Ab	9,3	Bb	11,5	Aa	9,8	Ab	11,2	Aab	12,5	Aa	10,1	Ab	10,4	ABb	12,9	Aa
10-20	10,1	Ab	9,5	Bb	11,6	Ba	10,5	Ab	11,1	Aab	12,0	ABa	9,4	Ac	11,3	Ab	13,0	Aa
20-30	9,3	Ab	9,5	Ab	11,0	Ba	9,2	Ab	10,4	Aab	11,3	Ba	8,7	Ac	10,3	Ab	13,6	Aa
0-30	10,0	Ab	9,4	Bb	11,4	Ba	9,7	Ab	11,4	Aa	12,0	ABa	9,5	Ac	11,0	Ab	13,4	Aa
Ano 2																		
0-5	10,0	Aa	12,3	Aa	12,3	Aa	11,6	Aa	13,7	Aa	14,5	Aa	11,4	Aa	14,1	Aa	13,8	Aa
5-10	10,5	Aa	11,1	Aa	10,6	Aa	9,8	Ab	11,2	Aab	12,8	Aa	9,7	Aa	12,2	Aa	11,8	Aa
10-20	10,3	Aa	10,5	Aa	10,8	Aa	9,9	Aa	12,2	Aa	12,3	Aa	8,9	Ab	12,6	Aa	11,8	Aa
20-30	10,0	Aa	9,6	Ba	10,1	Ba	9,0	Ab	10,5	Bab	13,2	Aa	9,6	Ab	13,5	Aa	12,9	ABa
0-30	10,3	Aa	10,8	Ba	10,9	Ba	10,1	Ab	11,9	ABab	13,2	Aa	9,9	Ab	13,1	Aa	12,5	ABa

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras maiúsculas compararam alturas de pastejo na mesma dose de nitrogênio, enquanto letras minúsculas compararam doses de nitrogênio na mesma altura de pastejo. Teste de Tukey (P<0,05).

TABELA 5 – ADIÇÃO DE CARBONO POR RAÍZES (Mg C ha⁻¹)^a DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS OBTIDOS AO FINAL DOS CICLOS DE PASTEJO, EM DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

Camada (cm)	Sem pastejo			15 cm			7 cm											
	0	75	150	0	75	150	0	75	150									
Ano 1																		
0-5	0,36	Aa	0,41	Ba	0,47	Aa	0,37	Aa	0,45	ABa	0,49	Aa	0,46	Aa	0,53	Aa	0,57	Aa
5-10	0,09	Ab	0,12	Aab	0,14	Aa	0,13	Aa	0,12	Aa	0,14	Aa	0,12	Aa	0,12	Aa	0,12	Aa
10-20	0,10	Aa	0,11	Aa	0,13	Aa	0,12	Aa	0,11	Aa	0,13	Aa	0,12	Aa	0,10	Aa	0,10	Aa
20-30	0,06	Ba	0,07	ABa	0,08	Aa	0,07	ABa	0,06	Ba	0,08	Aa	0,09	Aa	0,09	Aa	0,09	Aa
0-30	0,62	Ab	0,71	Aab	0,83	Aa	0,68	Aa	0,75	Aa	0,84	Aa	0,78	Aa	0,85	Aa	0,88	Aa
Ano 2																		
0-5	0,50	Aa	0,60	Aa	0,54	Aa	0,53	Aa	0,55	Aa	0,50	Aa	0,59	Aa	0,48	Aa	0,46	Aa
5-10	0,13	Aa	0,15	Aa	0,16	Aa	0,14	Aa	0,15	Aa	0,14	Aa	0,14	Aa	0,12	Aa	0,11	Aa
10-20	0,06	Aa	0,06	ABa	0,07	Aa	0,05	Aab	0,07	Aa	0,04	Bb	0,05	Aa	0,05	Ba	0,04	Ba
20-30	0,03	Aa	0,04	Aa	0,05	Aa	0,03	Aa	0,05	Aa	0,03	Ba	0,03	Aa	0,04	Aa	0,03	Ba
0-30	0,72	Aa	0,81	Aa	0,82	Aa	0,80	Aa	0,80	Aa	0,76	ABa	0,85	Aa	0,67	Aab	0,62	Bb

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras maiúsculas compararam alturas de pastejo na mesma dose de nitrogênio, enquanto letras minúsculas compararam doses de nitrogênio na mesma altura de pastejo. Teste de Tukey (P<0,05). ^a No cálculo da adição de C pelas raízes foi acrescida a rhizodeposição de 65% do total de C produzido pelas raízes (BOLINDER et al., 2007).

TABELA 6 – ADIÇÃO DE NITROGÊNIO POR RAÍZES (kg N ha⁻¹) DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS OBTIDOS AO FINAL DOS CICLOS DE PASTEJO, EM DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

Camada (cm)	Sem pastejo			15 cm			7 cm											
	0	75	150	0	75	150	0	75	150									
Ano 1																		
0-5	13,3	Ab	12,7	Bb	18,6	Ba	10,9	Ab	17,5	Aa	19,8	Ba	14,2	Ac	20,2	Ab	26,5	Aa
5-10	3,0	Ab	3,7	Ab	5,5	Aa	4,1	Ab	4,4	Aab	5,8	Aa	3,9	Aa	4,3	Aa	5,4	Aa
10-20	3,3	Aa	3,4	Aa	5,1	Aa	4,0	Aa	4,0	Aa	5,3	Aa	3,6	Aa	3,9	Aa	4,4	Aa
20-30	1,9	Ab	2,3	Aab	2,9	Ba	2,1	Ab	2,1	Ab	3,1	ABa	2,8	Ab	3,0	Ab	4,0	Aa
0-30	21,5	Ab	22,0	Bb	32,1	Ba	21,1	Ac	28,1	ABb	34,0	ABa	24,4	Ac	31,4	Ab	40,3	Aa
Ano 2																		
0-5	16,2	Ab	22,1	Aa	22,0	Aa	22,3	Aa	23,2	Aa	24,0	Aa	21,6	Aa	20,7	Aa	18,7	Aa
5-10	5,2	Aa	5,7	Aa	5,8	Aa	4,6	Aa	5,6	Aa	5,7	Aa	4,6	Aa	4,8	Aa	4,2	Aa
10-20	2,2	Aa	2,0	Aa	2,3	Aa	1,8	Aa	2,4	Aa	1,7	Aa	1,7	Aa	1,8	Aa	1,4	Aa
20-30	1,1	Aa	1,1	Aa	1,5	Aa	1,0	Aa	1,5	Aa	1,0	Aa	0,9	Aa	1,5	Aa	1,0	Aa
0-30	24,5	Aa	28,3	Aa	29,5	ABa	27,2	Aa	30,2	Aa	30,5	Aa	26,6	Aa	27,6	Aa	24,0	Ba

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras maiúsculas compararam alturas de pastejo na mesma dose de nitrogênio, enquanto letras minúsculas compararam doses de nitrogênio na mesma altura de pastejo. Teste de Tukey (P<0,05).

Os efeitos da adubação nitrogenada aumentaram a adição de carbono pelas raízes (camada 0-30 cm) somente no ano 1 e no tratamento sem pastejo, em 34% em relação à ausência de adubação, porém sem efeitos no pastejo à 15 e 7 cm (TABELA 5). No ano 2 não houve efeito da adubação nitrogenada, exceto quando esta foi de 150 kg N ha⁻¹ no tratamento pastejado à 7 cm, a qual reduziu a adição em reduziu em 0,23 Mg C ha⁻¹. Já a dição de nitrogênio pelas raízes teve aumento de 33-39% com adubação nitrogenada nas doses de 75 e 150 kg N ha⁻¹ em relação à ausência de adubação em todos os sistemas avaliados no ano 1, porém sem efeitos no ano 2 (TABELA 6).

2.5.2 ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO PELA PARTE AÉREA

O pastejo afetou significativamente o desenvolvimento de parte aérea de planta (TABELA 7). No ano 1 o pastejo à 15 cm, independentemente da dose de N aplicada, reduziu a biomassa total de parte aérea em 24% e a biomassa residual em 74% em relação ao sem pastejo. No ano 2 o pastejo à 15 cm não causou redução na biomassa total de parte aérea, sendo similar ao sem pastejo com média de 4,20 Mg ha⁻¹. Porém, para a biomassa residual, o pastejo à 15 cm teve redução significativa de 57 a 65% em comparação ao sem pastejo.

Ao comparar as duas alturas de pastejo no ano 1, não houveram diferenças significativas na biomassa pastejada, residual e total de parte aérea. Porém, no ano 2 é possível identificar efeito do pastejo à 7 cm em aumentar a quantidade de biomassa pastejada, principalmente na dose de 150 kg N ha⁻¹, sendo 27% superior ao 15 cm. Aliado à isso, a biomassa residual foi 31 a 50% inferior no pastejo à 7 cm em todas as doses de N avaliadas comparado ao pastejo à 15 cm. No que diz respeito à biomassa produzida, as duas alturas de pastejo foram significativamente similares.

A adubação nitrogenada influenciou significativamente o desenvolvimento de parte aérea da aveia preta (TABELA 7). No ano 1 os incrementos na biomassa produzida em todos os sistemas foram de 73 a 124% da ausência de adubação para a maior dose aplicada. Já para o ano 2 esse incremento é de 25-27%. Apesar dos aumentos na biomassa pastejada a partir do aumento da dose de nitrogênio em ambos os anos, a biomassa residual nas alturas de pastejo de 15 e 7 cm não foi

afetada significativamente por esse fator, resultando em respectivos 1,25 e 0,62 Mg MS ha⁻¹, para ano 1, e 1,63 e 0,99 Mg MS ha⁻¹, para ano 2.

Sendo assim, como o pastejo não afetou os teores de carbono e nitrogênio no tecido de parte aérea (TABELA 8), o pastejo à 15 cm reduziu a adição de carbono (TABELA 9) e nitrogênio (TABELA 10) pela biomassa residual e a adição total em relação ao sem pastejo. Tais reduções nas adições de carbono e nitrogênio pela biomassa residual foram de 63 a 78% no ano 1 e 51 a 67% no ano 2. Da mesma forma, as adições totais de carbono e nitrogênio foram reduzidas pelo pastejo em 55 a 63% no ano 1 e 28 a 49% no ano 2, dessa forma as adições totais de carbono pela parte aérea (incluindo o esterco) pelo pastejo à 15 cm de altura foram 0,79 e 0,97 Mg C ha⁻¹ enquanto as de nitrogênio foram 40,5 e 51,2 kg N ha⁻¹, no ano 1 e 2 respectivamente.

No ano 1 não houveram diferenças significativas entre as duas alturas de pastejo para as adições de carbono (TABELA 9) e nitrogênio (TABELA 10) pela parte aérea da planta. Já no ano 2, o pastejo à 7 cm resultou em 33 a 56 % menor adição de carbono e nitrogênio residual em relação ao 15 cm. Além disso na dose de 150 kg N ha⁻¹ o pastejo à 7 cm resultou em 26 e 29% maior adição de carbono e nitrogênio via esterco. Apesar disso as adições totais de carbono e nitrogênio pela parte aérea foram similares entre as duas alturas de pastejo, exceto na dose de 150 kg N ha⁻¹ no ano 2 em que o 7 cm adicionou 28% de carbono e 26% de nitrogênio a menos que o pastejo à 15 cm.

Em ambos os anos a adubação nitrogenada aumentou as adições de carbono (TABELA 9) e nitrogênio (TABELA 10) pela biomassa residual da aveia preta no sem pastejo. Porém, efeitos nos sistemas pastejados ocorreram apenas no 15 cm no ano 2, em que a maior dose aplicada aumentou a adição de nitrogênio em 117%. Da mesma forma, as adições totais de carbono e nitrogênio pela parte aérea foram incrementadas em todos os sistemas, independentemente do ano.

TABELA 7 – BIOMASSA DE PARTE AÉREA (Mg MS ha⁻¹) DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS DE DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

		Sem pastejo			15 cm			7 cm		
		0	75	150	0	75	150	0	75	150
Ano 1	Pastejada ^a	-	-	-	1,11	Ab	2,99	Aa	3,27	Aa
	Residual ^b	3,51	Ac	5,01	Ab	6,08	Aa	1,09	Ba	1,41
	Total	3,51	Ac	5,01	Ab	6,08	Aa	2,20	Bb	4,69
Ano 2	Pastejada	-	-	-	2,31	Ab	2,91	Aa	2,92	Ba
	Residual	3,48	Ab	4,25	Aa	4,42	Aa	1,49	Ba	1,91
	Total	3,48	Ab	4,25	Aa	4,42	Aa	3,81	Ab	4,84
								2,74	Ab	3,39
								0,98	Ca	1,03
								3,72	Ab	4,42
									Aab	3,71
									Ca	0,95
									Aab	4,66

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras maiúsculas comparam alturas de pastejo na mesma dose de nitrogênio, enquanto letras minúsculas comparam doses de nitrogênio na mesma altura de pastejo. Teste de Tukey (P<0,05). ^a Somatório das diferenças entre biomassa pré e pós pastejo ao longo dos ciclos de pastejo. ^b Biomassa pós pastejo do último ciclo de pastejo.

TABELA 8 – TEORES DE CARBONO E DE NITROGÊNIO DA PARTE AÉREA DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS DE DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

		Sem pastejo			15 cm			7 cm		
		0	75	150	0	75	150	0	75	150
Carbono (g C kg⁻¹)										
Ano 1	Pastejado	-	-	-	411	425	431	416	413	428
	Residual	428	438	433	403	409	408	402	397	402
Ano 2	Pastejado	-	-	-	412	426	430	415	410	427
	Residual	423	434	434	404	410	409	405	402	404
Nitrogênio (g N kg⁻¹)										
Ano 1	Pastejado	-	-	-	20,5	24,6	31,2	20,6	19,8	31,8
	Residual	13,7	19,6	21,7	14,3	19,7	20,2	13,8	18,7	21,7
Ano 2	Pastejado	-	-	-	20,5	25,0	31,3	20,5	20,8	31,8
	Residual	13,5	19,5	21,8	14,4	19,7	24,2	13,7	18,9	21,9

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Dados sem análise estatística, pois para reduzir custo de análise associado ao elevado número de amostras de parte aérea, as amostras de pré pastejo dos diferentes ciclos de pastejo e das quatro repetições foram unidas numa única amostra composta que representou os teores de carbono e nitrogênio da biomassa pastejada. Além disso, as amostras pós pastejo do último ciclo de pastejo das quatro repetições foram unidas numa única amostra composta que representou os teores de carbono e nitrogênio da biomassa residual.

TABELA 9 – ADIÇÃO DE CARBONO PELA PARTE AÉREA (Mg C ha⁻¹) DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 75 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS DE DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

		Sem pastejo			15 cm			7 cm		
		0	75	150	0	75	150	0	75	150
Ano 1	Esterco ^a	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Residual ^b	1,50	Ac 2,19	Ab 2,63	Aa 0,12	Ab 0,34	Aa 0,38	Aa 0,18	Ab 0,41	Aa 0,48
	Total	1,50	Ac 2,19	Ab 2,63	Aa 0,44	Ba 0,51	Ba 0,58	Ba 0,24	Ba 0,22	Ba 0,28
Ano 2	Esterco	-	-	-	0,56	Bb 0,85	Bab 0,96	Ba 0,42	Bb 0,63	Bab 0,77
	Residual	1,49	Ab 1,86	Aa 1,92	Aa 0,26	Aa 0,33	Aa 0,34	Ba 0,31	Ab 0,38	Aab 0,43
	Total	1,49	Ab 1,86	Aa 1,92	Aa 0,60	Ba 0,61	Ba 0,78	Ba 0,39	Ca 0,41	Ca 0,38

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras maiúsculas compararam alturas de pastejo na mesma dose de nitrogênio, enquanto letras minúsculas compararam doses de nitrogênio na mesma altura de pastejo. Teste de Tukey (P<0,05). ^a A adição efetiva de carbono ao solo pela da biomassa pastejada foi somente via esterco, estimada como sendo 0,2785 vezes a biomassa pastejada, considerando uma digestibilidade de 72,15% para bovinos e aveia preta. ^b Refere-se ao pós pastejo do último ciclo de pastejo; ou a produção total no sem pastejo.

TABELA 10 – ADIÇÃO DE NITROGÊNIO PELA PARTE AÉREA (Mg N ha⁻¹) DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS DE DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

	Sem pastejo			15 cm			7 cm		
	0	75	150	0	75	150	0	75	150
Ano 1									
Estercos ^a	-	-	-	6,2	Ab	19,6	Aa	27,4	Ba
Residual ^b	47,8	Ac	97,6	Ab	131,5	Aa	15,5	Bb	24,4
Total	47,8	Ac	97,6	Ab	131,5	Aa	21,7	Bb	44,0
Ano 2									
Estercos	-	-	-	12,7	Ac	19,3	Ab	24,7	Ba
Residual	47,3	Ab	83,3	Aa	94,1	Aa	21,2	Bb	29,6
Total	47,3	Ab	83,3	Aa	94,1	Aa	33,9	Bb	48,9

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras maiúsculas comparam alturas de pastejo na mesma dose de nitrogênio, enquanto letras minúsculas comparam doses de nitrogênio na mesma altura de pastejo. Teste de Tukey (P<0,05). ^a A adição efetiva de nitrogênio ao solo pela da biomassa pastejada foi somente via estercos, estimada como sendo 0,2785 vezes a biomassa pastejada, considerando uma digestibilidade de 72,15% para bovinos e aveia preta. ^b Refere-se ao pós pastejo do último ciclo de pastejo; ou a produção total no sem pastejo.

2.5.3 ADIÇÃO TOTAL DE CARBONO E NITROGÊNIO PELA PLANTA

O pastejo afetou significativamente as adições totais (parte aérea + raízes) de carbono e nitrogênio pela aveia preta ao solo (GRÁFICO 1). No ano 1, o pastejo à 15 cm reduziu tais adições em 41 a 47% em relação ao sem pastejo. No ano 2 a redução pelo pastejo à 15 cm foi de 28 a 37% para o carbono e de 21 a 34% para o nitrogênio. Dessa forma as adições totais de carbono pelo pastejo à 15 cm foram 1,6 e 1,8 Mg C ha⁻¹ enquanto as de nitrogênio foram 68,2 e 80,5 kg N ha⁻¹, nos respectivos anos. Em ambos anos não houveram diferenças entre as alturas de pastejo na adição total de carbono e nitrogênio. Contudo, no ano 2 e na dose de 150 kg N ha⁻¹, o pastejo à 7 cm reduziu a adição de carbono e nitrogênio em 25% em comparação ao 15 cm.

A adubação nitrogenada teve efeitos significativos nas adições totais de carbono e nitrogênio (GRÁFICO 1). No ano 1 o aumento da dose de 0 pra 150 kg N ha⁻¹ elevou a adição de carbono em 63, 45 e 67% e de nitrogênio em 147, 121 e 138% para o sistema sem pastejo, 15 cm e 7 cm, respectivamente. Já para o ano 2, as adições de carbono somente foram incrementadas no sistema sem pastejo em 25%, enquanto que as adições de nitrogênio foram elevadas com o aumento da dose de N em 85, 83 e 55% para os sistemas sem pastejo, 15 cm e 7 cm, respectivamente.

2.5.4 RAZÃO PARTE AÉREA:RAIZ

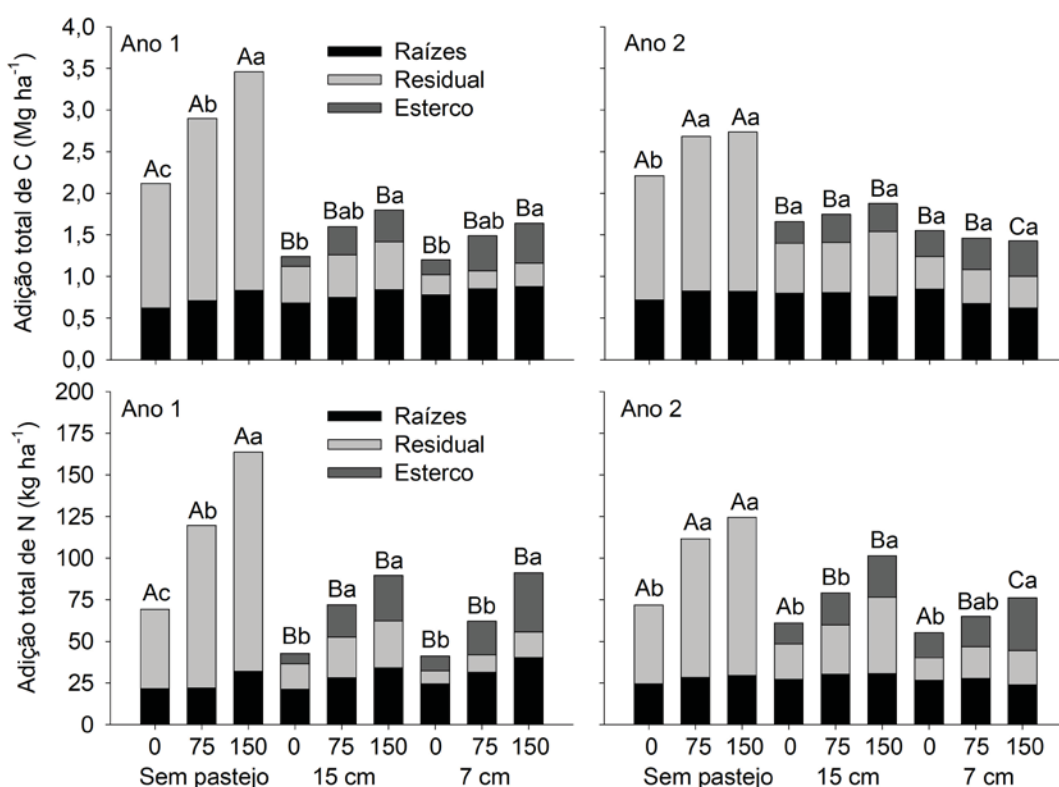
O pastejo afetou significativamente a razão PA:R da pastagem de aveia (TABELA 11). No ano 1 e na ausência de N, o pastejo à 15 cm reduziu a razão de 3,05 para 1,66. Já para o ano 2 e na dose 150 kg N ha⁻¹, o pastejo aumentou a razão de 2,79 para 3,61. Entre as duas alturas de pastejo não foram observadas diferenças significativas.

Por sua vez, a adubação nitrogenada teve seus efeitos concentrados no pastejo à 15 e à 7 cm. Em ambos anos ao aumentar a dose de N aplicada houve aumento na razão de 1,95 para 3,20 e de 1,89 pra 3,60, respectivamente para 15 e 7 cm. Por outro lado, o sem pastejo não respondeu ao N aplicado com relação média de 3,42 para ano 1 e 2,66 para ano 2.

2.5.5 ADIÇÃO DE CARBONO PELAS CULTURAS DE GRÃOS

Não houveram diferenças significativas para a adição de carbono pelo milho e pela soja (TABELA 12). Dessa forma, a adição média foi de 5,14 Mg C ha⁻¹ para o milho e 2,19 Mg C ha⁻¹ para soja. Considerando os dois anos do sistema de integração lavoura-pecuária a adição média anual foi de 5,26 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹.

GRÁFICO 1 – ADIÇÃO TOTAL DE CARBONO E NITROGÊNIO POR PASTAGEM DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS DE DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.



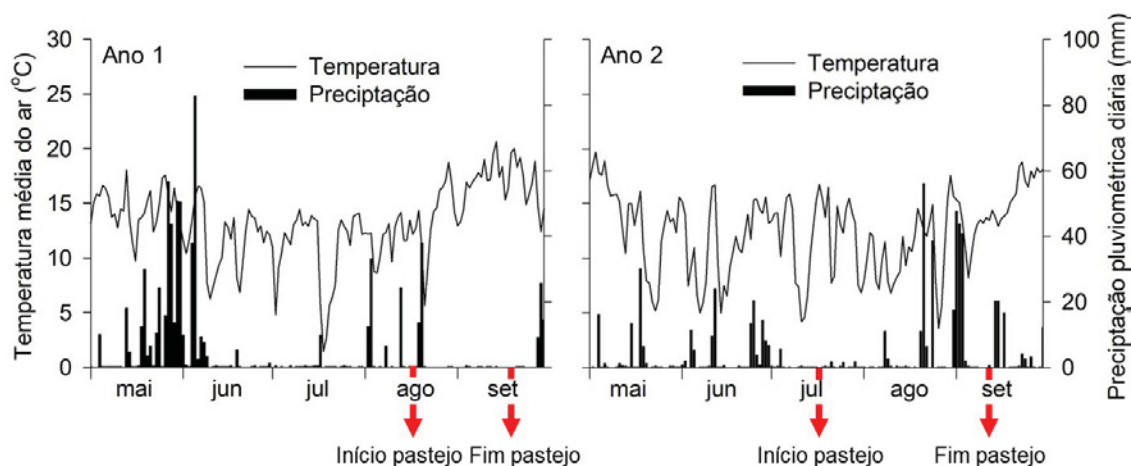
FONTE: O autor (2019)

LEGENDA: Letras maiúsculas comparam alturas de pastejo na mesma dose de nitrogênio, enquanto letras minúsculas comparam doses de nitrogênio na mesma altura de pastejo. Teste de Tukey (P<0,05). Esterco: A adição efetiva de carbono ao solo pela biomassa pastejada foi somente via esterco, estimada como sendo 0,2785 vezes a biomassa pastejada, considerando uma digestibilidade de 72,15% para bovinos e aveia preta. Residual: Refere-se ao pós pastejo do último ciclo de pastejo; ou a produção total no sem pastejo. Raízes: Refere-se à quantidade total de raízes no perfil avaliado (0-30 cm).

2.5.6 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS

Os dois anos avaliados apresentaram condições climáticas contrastantes (GRÁFICO 2). No ano 1 com excesso de chuvas durante os meses de maio e junho (>500 mm), e com baixa precipitação em julho e setembro (<66 mm) destacou-se como um ano fora das normais climatológicas para o município (APÊNDICE 2). Dessa forma o período anterior ao pastejo foi muito chuvoso, atrasando a entrada dos animais na área, e após o início do pastejo houve déficit hídrico, com precipitação inferior à 50 mm, fato esse que encurtou a duração do pastejo para 34 dias. Já para o ano 2, a distribuição de chuvas foi regular, com cerca de 350 mm durante o período de pastejo, condição climática mais próxima das normais climatológicas, proporcionando 65 dias de pastejo.

GRÁFICO 2 – PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DIÁRIA (BARRAS) E TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA (LINHAS) DURANTE OS DOIS CICLOS DE CULTIVO DE AVEIA PRETA (2017 E 2018).



FONTE: O autor (2018).

TABELA 11 – RAZÃO PARTE AÉREA:RAIZ DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 kg N ha⁻¹). DADOS DE DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

	Sem pastejo			15 cm			7 cm			
	0	75	150	0	75	150	0	75	150	
Ano 1	3,1	Aa	3,6	Aa	1,7	Bb	3,0	Aa	2,8	Aa
Ano 2	2,4	Aa	2,8	Aa	2,3	Ab	2,8	Aab	3,6	ABa
					</					

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras maiúsculas comparam alturas de pastejo na mesma dose de nitrogênio, enquanto letras minúsculas comparam doses de nitrogênio na mesma altura de pastejo. Teste de Tukey (P<0,05). A razão parte aérea: raiz foi obtida através da divisão da biomassa total de parte aérea pela biomassa total de raiz obtida no perfil avaliado (0-30 cm).

TABELA 12 – ADIÇÃO TOTAL DE CARBONO (Mg C ha⁻¹) PELA CULTURAS DA AVEIA PRETA MILHO E SOJA CULTIVADOS EM ROTAÇÃO BIANUAL COM PASTAGEM DE AVEIA PRETA SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm). DADOS DE DOIS ANOS, 2017 E 2018. CURITIBANOS – SC.

	Sem pastejo		15 cm		7 cm	
Ano 1						
Aveia ^b	2,83 a		1,56 b		1,45 b	
Milho ^a	* ns		4,98		5,29	
Adição total	* ns		6,54		6,74	
Ano 2						
Aveia ^b	2,54 a		1,76 b		1,48 b	
Soja ^a	2,05 ns		2,24		2,29	
Adição total	4,59 ns		4,00		3,77	

FONTE: O autor (2019).

LEGENDA: Letras minúsculas na linha comparam alturas de pastejo; ns= não significativo pelo teste de Tukey (P<0,05). ^a adição de carbono pela cultura do milho e da soja foi estimada a partir da conversão da produtividade grãos em matéria seca pelos fatores 1,04 e 0,92, respectivamente (Pierri et al., 2016) adicionando mais 30% referente à biomassa de raízes e multiplicando os valores pelo teor médio de carbono de 400 g C kg⁻¹ (Zanatta et al., 2007). ^b a adição de carbono pela aveia preta foi considerada pela média de adição entre as doses de nitrogênio aplicadas no inverno, somando parte aérea e raiz. ^c para a adição média anual foi considerado dois anos, um composto por aveia e milho e o segundo por aveia e soja. * não avaliado.

2.6 DISCUSSÃO

2.6.1 ALTERAÇÕES PELO PASTEJO NA ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO

A biomassa radicular ao final do período de pastejo não foi afetada pelo pastejo da aveia preta à 15 cm em relação ao sem pastejo, contrariando a hipótese inicial do trabalho (TABELA 2). Esse comportamento indica que a translocação de fotoassimilados das raízes para a parte aérea foi compensada pela quantidade de tecido fotossintetizante ainda remanescente na planta, capaz de manter a síntese desses compostos em níveis adequados no período pós pastejo, dessa maneira não reduzindo a biomassa radicular (CHEN et al., 2015; GONG et al., 2015). Segundo os autores, quando ocorre o pastejo, parte do carbono, nitrogênio e alguns nutrientes são direcionados à parte aérea da planta, visando o rebrote, dessa forma, quanto maior for a quantidade de parte aérea pastejada, maior seria a redução na produção de raízes, o que não ocorreu neste estudo.

Os ciclos de pastejo com intervalo de aproximadamente 25 dias, empregados nesse experimento podem ter favorecido o rebrote da planta, permitindo também que as raízes retomassem seu crescimento logo após o restabelecimento do tecido fotossintético (FULKERSON; DONAGHY, 2001). Avaliando intensidades de pastejo conduzido de forma rotacional Gong et al. (2015) também não encontraram diferenças significativas na biomassa de raiz, fato esse atribuído à capacidade de rebrote da planta, porém no pastejo intensivo os resultados indicam reduções na biomassa radicular à longo prazo.

Apesar do pastejo não ter aumentando a adição de carbono e nitrogênio pelas raízes (TABELA 5 e 6), não houve redução nesses parâmetros. Isso demonstra a importância do pastejo num sistema de ILP, visto que as raízes são cruciais para a formação de matéria orgânica no solo (RASSE et al., 2005; DIGNAC et al., 2017). Tal importância está relacionada ao maior tempo de residência das raízes no solo enquanto que a parte aérea é rapidamente mineralizada e transformada em CO₂, fato esse que eleva a contribuição das raízes para a matéria orgânica do solo em até 3 vezes mais que a parte aérea (RASSE et al., 2005; KÄTTERER et al., 2011). Além disso o carbono oriundo da rizodeposição atua fortemente na estabilização da MOS devido a sua reatividade tornando-o absorvido pelos minerais do solo, ou ainda sendo utilizado como fonte de energia prontamente

disponível aos microrganismos, favorecendo os processos de mineralização dos resíduos (PAUSCH; KUZYAKOV, 2017). Dessa forma uma prática de manejo que promova a manutenção da adição de carbono e nitrogênio pelo sistema radicular, à exemplo da altura de pastejo à 15 cm, representa uma forma de promover a qualidade da MOS a longo prazo, com o benefício da produção animal.

A menor adição de carbono e nitrogênio pela aveia preta pastejada à 15 cm em relação à aveia preta não pastejada (GRÁFICO 1) foi decorrente principalmente da remoção da parte aérea pelos animais e da consequente diminuição da quantidade de biomassa residual (TABELA 7). Tal fato poderia ser compensado por um período de rebrote após o último ciclo de pastejo antes da dessecação da pastagem. De acordo com Fulkerson e Donaghy (2001), com um período de 12 a 18 dias de rebrote para o azevem (*Lolium perenne* L.) foi capaz de recuperar a perda de parte aérea pela desfolha.

A redução nas adições de carbono e nitrogênio pela aveia preta pastejada à 7 cm e na dose de 150 kg N ha⁻¹ ano no ano 2 (GRÁFICO 1) podem ser explicadas pelo fato de que no ano com condição climática normal há maior produção de biomassa aérea com a adubação, e consequentemente maior quantidade de carbono e nitrogênio é removida e exportada pelos animais no pastejo intensivo (SCHIPPER et al., 2017). Nesse tratamento, houve maior remoção de parte aérea (TABELA 7) e considerável redução na produção de raízes (TABELA 2) quando houve adubação, resultando em menor adição de carbono ao solo que o pastejo à 15 cm (GRÁFICO 1).

Ainda, devido à baixa quantidade de carbono e nitrogênio da aveia preta na forma residual pelo pastejo à 7 cm (GRÁFICO 1), este poderá representar um risco para a manutenção dos estoques de MOS. Pois, a combinação entre menor adição de carbono e nitrogênio e baixa cobertura do solo pela palhada (ASSMANN et al., 2014; NUNES et al., 2018), como o observado no presente estudo, levarão à redução dos estoques de carbono e nitrogênio do solo para os sistemas com manejo de alta intensidade (CHEN et al., 2015; GONG et al., 2015). Nesse sentido, o manejo do pastejo de aveia preta à 15 cm de altura mostra-se interessante para manutenção da palhada sob a superfície do solo, acima do que ocorre no pastejo à 7 cm, bem como para manter a adição de carbono e nitrogênio via raízes em níveis similares ao sem pastejo.

2.6.2 ALTERAÇÕES NA ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO PELA ADUBAÇÃO NITROGENADA

Com aumento da dose de N aplicada houve incremento na adição total de carbono e nitrogênio em todos os sistemas avaliados, comprovando a hipótese inicial do trabalho (GRÁFICO 1). Apesar disso, seus efeitos foram de maior intensidade para adições de parte aérea do que de raízes (TABELA 5 e 7). Os resultados encontrados corroboram com Gong et al. (2015) e Poeplau et al. (2018), os quais citam que a adição de fertilizantes em pastagem nem sempre aumentam o crescimento radicular, porém resultam em incrementos na relação parte aérea:raiz. Segundo os autores isso acontece quando não há limitação de nutrientes no solo, a exemplo de quando é realizada a adubação, dessa forma os investimentos da planta são redirecionados para a parte aérea.

Os aumentos na adição de carbono e nitrogênio pela parte aérea da aveia preta, principalmente na forma de esterco (TABELA 9 e 11) indicam que a adubação nitrogenada aumentou a produção primária líquida da planta, porém resulta em elevada remoção da biomassa aérea pelo pastejo (POEPLAU et al., 2018), resultando em baixa quantidade residual. Apesar disso, o retorno de carbono e nitrogênio ao solo pelo esterco, aumentado pela adubação nitrogenada, equilibra a menor adição pela biomassa residual. A maior intensidade de resposta dessas variáveis no ano 1 à aplicação de nitrogênio, podem estar relacionadas à limitação de nitrogênio no solo. Isso ocorreu devido ao cultivo anterior com milho, o qual resultou em grande quantidade de palhada sob o solo, imobilizando nitrogênio (BIELUCZYK et al., 2017) e limitando o crescimento da aveia.

A redução na adição de carbono e nitrogênio por raízes no ano 2 com aplicação de 150 kg N ha^{-1} no pastejo à 7 cm podem estar relacionada aos efeitos de maior remoção de parte aérea, como já discutido, além da baixa eficiência do N aplicado nesse tratamento. Segundo Gong et al. (2015), quando a desfolha é muita intensa, as restrições da área foliar para a fotossíntese reduzem a produção de substrato suficiente para o rebrote da planta, causando menor eficiência de uso do N aplicado e consequentemente reduzindo os investimentos da planta em sistema radicular. Quando ocorre maior frequência de pastejo aliada à maior remoção de folhas, como observado na presente condição, o crescimento radicular da planta é

mais lento durante o período de rebrote (FULKERSON; DONAGHY, 2001), resultando em menor quantidade de raízes ao final do último ciclo de pastejo.

2.6.3 EFEITO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NA ADIÇÃO DE CARBONO E NITROGÊNIO

As diferenças nos padrões de distribuição de raízes entre os anos de avaliação podem ser atribuídas às condições climáticas contrastantes de cada ano (GRÁFICO 2). Para o ano 1 foi observado déficit pluviométrico, principalmente durante o período de pastejo, o que pode ter ocasionado estresse hídrico às plantas estimulando-as a aumentar o crescimento radicular, tanto lateralmente, quanto em profundidade (GREGORY, 2006; LYNCH, 2018). Tal fato é suportado pela maior quantidade de biomassa radicular em profundidade (10-20 e 20-30 cm) no ano 1 em relação ao ano 2 (TABELA 2).

Aliado a isso, é possível observar diferenças na produção de biomassa de parte aérea, onde no ano 1, o pastejo reduziu a biomassa produzida, enquanto no 2 a biomassa produzida foi similar entre os tratamentos (TABELA 7). Tal fato suporta a hipótese do déficit hídrico no ano 1, visto que na ocasião de remoção de parte aérea na forma de pastejo, o rebrote não foi capaz de recuperar o potencial produtivo da planta (WU et al., 2011), assim como ocorreu no ano 2.

Ainda, através da razão PA:R (TABELA 11) é possível identificar efeito do pastejo no ano 1 em reduzir essa variável, evidenciando que numa condição de estresse hídrico, associado à desfolha, os padrões de distribuição de fotoassimilados na planta são direcionados às raízes em detrimento à parte aérea. Segundo Poorter et al. (2012) a planta redirecionará seus recursos para onde são mais limitantes para seu crescimento, no caso do ano 1, com a limitação de água, os investimentos da planta foram em raízes em profundidade (TABELA 2).

2.6.4 SISTEMA DE ROTAÇÃO DE CULTURAS NO VERÃO EM ILP COMO ALTERNATIVA AO AUMENTO DAS ADIÇÕES DE CARBONO

Os resultados durante o curto período de experimentação, indicaram que o pastejo não alterou as adições de carbono pela cultura de verão (TABELA 12), fato esse que pode estar relacionado à não degradação física do solo, capaz de reduzir o

potencial produtivo das culturas. Em estudo conduzido por Cecagno et al. (2016), apesar das maiores densidades do solo em camadas superficiais em função do pastejo de maior intensidade, este não foi capaz de reduzir significativamente a produtividade da soja. Ainda, segundo Conte et al. (2011), o pastejo intensivo aumenta problemas com compactação, porém sem atingir níveis críticos que limitem o desenvolvimento das culturas de grãos. Da mesma forma, a maior ciclagem de nutrientes, principalmente pela maior entrada de nitrogênio durante a fase de pastejo, oriundo da urina dos animais (HAN et al., 2008) pode ter favorecido o alto desempenho da cultura do milho no verão nos sistemas pastejados.

As adições de carbono provenientes da cultura de verão no sistema de ILP (TABELA 12), foram acima do proposto por Bayer et al. (2006) que é $3,92 \pm 1,30 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Tal fato é devido principalmente à presença da cultura do milho no sistema de rotação bianual, a qual sozinha representou 50% da adição de carbono, sobrepondo os efeitos que ocorreram pela adição da aveia preta. Sendo assim, se o milho não fosse utilizado e que o presente sistema fosse constituído apenas pela sucessão aveia e soja, muito comum na região sul do Brasil, as adições cairiam para $3,82 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, valor esse próximo do limite inferior proposto por Bayer et al. (2006) podendo apresentar um risco para a manutenção da MOS no sistema.

2.7 CONCLUSÕES

O pastejo moderado de aveia preta, com altura de 15 cm, não altera a adição de carbono e nitrogênio ao solo pelas raízes em relação à aveia preta não pastejada, não confirmando, portanto, a hipótese que o pastejo aumenta essa adição. Contudo, isso é um resultado interessante em evidenciar que o pastejo moderado pelo menos mantém a adição por raízes, que segundo alguns estudos é a principal contribuinte ao estoque de matéria orgânica do solo. No entanto, o pastejo diminui a adição de carbono e nitrogênio pela parte aérea (esterco mais residual) e, consequentemente, a adição total desses elementos ao solo em relação à aveia preta não pastejada. Essa diminuição da adição pela parte aérea pode supostamente ser atenuada por um período maior de rebrote após o último ciclo de pastejo, que aumente a biomassa residual. O pastejo intensivo, com altura de 7 cm, em geral não altera a adição total de carbono e nitrogênio, nem a adição via parte aérea ou via raízes em relação ao pastejo moderado, com altura de 15 cm. No

entanto, em ano com precipitação próxima da normal e em dose de nitrogênio de 150 kg N ha⁻¹, o pastejo intensivo tem menores adições em relação ao pastejo moderado. A recomendação, portanto, é manter a altura de pastejo de 15 cm.

Quanto ao efeito da adubação nitrogenada em cobertura da aveia preta, o incremento da dose de nitrogênio até 150 kg N ha⁻¹ em geral aumenta a adição total de carbono e nitrogênio ao solo, principalmente devido ao aumento na adição via parte aérea, tanto na aveia preta pastejada como não pastejada. A adubação nitrogenada em geral não altera as adições de carbono e nitrogênio via raízes nas condições do presente estudo.

A altura de pastejo não afetou a adição de carbono pelos resíduos da cultura de verão. Porém, os resultados de curto prazo do presente experimento indicam que o sistema de integração lavoura-pecuária, com rotação de culturas é eficiente em adicionar carbono ao solo em níveis acima do previsto para manutenção dos estoques de carbono no solo.

2.8 REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMADO, T. J. C. et al. Potential of Carbon Accumulation in No-Till Soils with Intensive Use and Cover Crops in Southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 35, n. 4, p. 1599-1607, 2006.

ASSMANN, J. M. et al. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 190, n. Supplement C, p. 52-59, 2014.

BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 91, n. 1, p. 217-226, 2006.

BIELUCZYK, W. et al. Soil carbon and nitrogen stocks, light organic matter, and remaining phosphorus under a crop-livestock integration system. **Semina-Ciencias Agrarias**, Londrina, v. 38, n. 4, p. 1825-1840, 2017.

BOLINDER, M. A. et al. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 118, n. 1-4, p. 29-42, 2007.

BOLINDER, M. A. et al. Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. **Canadian Journal of Soil Science**, Alberta, v. 92, n. 6, p. 821-833, 2012.

CARVALHO, P. C. D. F. et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 88, n. 2, p. 259-273, 2010.

CARVALHO, P. D. F. et al. Integrating the pastoral component in agricultural systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 47, 2018.

CECAGNO, D. et al. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 156, p. 54-62, 2016.

CHEN, W. et al. Improved grazing management may increase soil carbon sequestration in temperate steppe. **Scientific Reports**, Londres, v. 5, p. 10892, 2015.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 129, n. Supplement C, p. 40-47, 2013.

CONTE, O. et al. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavourapecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1301-1309, 2011.

DIGNAC, M.-F. et al. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Heidelberg, v. 37, n. 2, p. 14, 2017.

FUKUSHIMA, R. S. et al. Comparison of acetyl bromide lignin with acid detergent lignin and Klason lignin and correlation with in vitro forage degradability. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdã, v. 201, n. Supplement C, p. 25-37, 2015.

FULKERSON, W. J.; DONAGHY, D. J. Plant-soluble carbohydrate reserves and senescence - key criteria for developing an effective grazing management system for ryegrass-based pastures: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 41, n. 2, p. 261-275, 2001.

GONG, X. Y. et al. Response of primary production and biomass allocation to nitrogen and water supplementation along a grazing intensity gradient in semiarid grassland. **European Journal of Agronomy**, Amsterdã, v. 63, p. 27-35, 2015.

GREGORY, P. J. **Plant roots: their growth, activity, and interaction with soils**. Blackwell Publishing Ltd, 2006.

HAN, G. et al. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 125, n. 1-4, p. 21-32, 2008.

KÄTTERER, T. et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 141, n. 1, p. 184-192, 2011.

LAL, R. et al. Management to mitigate and adapt to climate change. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 66, n. 4, p. 276-285, 2011.

LONG, R. J. et al. Digestibility, nutrient balance and urinary purine derivative excretion in dry yak cows fed oat hay at different levels of intake. **Livestock Production Science**, Amsterdã, v. 88, n. 1, p. 27-32, 2004.

LYNCH, J. P. Rightsizing Root Phenotypes for Drought resistance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 69, n. 13, p. 3279-3292, 2018.

MIGUEL, M. F. et al. Pasture characteristics of Italian ryegrass and milk production under different management strategies. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 863-868, 2012.

NUNES, P. A. D. A. et al. Grazing intensity determines pasture spatial heterogeneity and productivity in an integrated crop-livestock system. **Grassland Science**, Hoboken, v. 65, p. 49-59, 2018.

PAUSCH, J.; KUZYAKOV, Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. **Global change biology**, Hoboken, v. 24, n. 1, p. 1-12, 2017.

PIERRI, L. D. et al. Sazonalidade e potencial energético da biomassa residual agrícola na região dos Campos Gerais do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, p. 129-137, 2016.

POEPLAU, C. et al. Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 265, p. 144-155, 2018.

POORTER, H. et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, Hoboken, v. 193, n. 1, p. 30-50, 2012.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M.-F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and Soil**, Amsterdã, v. 269, n. 1, p. 341-356, 2005.

SANTOS, H. G. D. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018.

SANTOS, N. Z. D. et al. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 111, n. 2, p. 208-218, 2011.

SCHIPPER, L. A. et al. A review of soil carbon change in New Zealand's grazed grasslands. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Lincoln, v. 60, n. 2, p. 93-118, 2017.

SCHUURMAN, J. J.; GOEDEWAAGEN, M. A. J. **Methods for the examination of root systems and roots**. Wageningen: Centre for Agricultural Publications and Documentation, 1971.

SILVA, F. D. D. et al. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 190, p. 60-69, 2014.

SILVEIRA, E. R. et al. Intensidade de pastejo e adubação nitrogenada na massa seca de aveia e produtividade do milho na integração lavoura-pecuária. **Semina-Ciencias Agrarias**, Londrina, v. 33, n. 4, p. 1323-1331, 2012.

SOUZA, E. D. D. et al. Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistema de integração agricultura-pecuária submetido a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1273-1282, 2008.

STERGIADIS, S. et al. Equations to predict methane emissions from cows fed at maintenance energy level in pasture-based systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 220, p. 8-20, 2016.

VELOSO, M. G. et al. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 268, p. 15-23, 2018.

WREGE, M. S. et al. **Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2. Brasília: Embrapa, 2012.

WU, Z. T. et al. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 17, n. 2, p. 927-942, 2011.

ZANATTA, J. A. et al. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 94, n. 2, p. 510-519, 2007.

ZHOU, G. et al. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 23, n. 3, p. 1167-1179, 2017.

3 CAPÍTULO II: ESTOQUE E LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM FUNÇÃO DE ALTURAS DE PASTEJO SOB INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA

3.1 RESUMO

O sistema de integração lavoura-pecuária (ILP) é caracterizado pelo elevado potencial de sequestro de carbono e nitrogênio no solo a longo prazo. Dessa forma, estudos de fracionamento da matéria orgânica do solo identificam efeitos do manejo a curto prazo na sua labilidade e dinâmica. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito de alturas de pastejo e adubação nitrogenada nos estoques e na labilidade de carbono e nitrogênio do solo em ILP. Os tratamentos estudados foram alturas de pastejo (sem pastejo, 15 cm e 7 cm) e doses de nitrogênio (0, 75 e 150 Kg N ha⁻¹), aplicados em cobertura na pastagem de aveia preta. Os resultados no curto prazo de experimentação mostraram que não houve efeito dos tratamentos nos estoques de carbono e nitrogênio do solo, sendo assim os estoques médios na camada 0-100 cm foram de 198,6 e 15,3 Mg ha⁻¹, respectivamente. Por outro lado, quando o pastejo foi à 7 cm de altura houveram reduções na labilidade do nitrogênio, indicando que o pastejo intensivo poderá reduzir a qualidade da matéria orgânica do solo. A adubação nitrogenada não alterou os estoques de carbono e nitrogênio no solo, porém, a maior dose elevou em média 19% os índices de labilidade de carbono e nitrogênio. Em um sistema de integração lavoura-pecuária o pastejo à 15 cm associado à adubação nitrogenada na dose de 150 kg N ha⁻¹ durante o inverno mostra-se eficiente em manter os estoques de carbono e nitrogênio e garantir a qualidade da matéria orgânica do solo.

Palavras-chave: Sequestro de carbono. Agricultura conservacionista. Intensidade de pastejo. Fracionamento físico. Mineralização.

3.2 ABSTRACT

Integrated crop-livestock systems (ICL) are characterized by the high potential of soil carbon and nitrogen sequestration in the long term. Therefore, studies in soil organic matter fractions are able to identify the management short-term effects on its lability and dynamics. The aim of this work was to evaluate the effect of grazing height and nitrogen fertilization on soil carbon and nitrogen stocks and lability in ICL. The treatments were grazing heights (no grazing, 15 cm and 7 cm) and nitrogen rates (0, 75 and 150 kg N ha⁻¹), applied in topdressing of black oat pasture. The results of the short term of experimentation showed no treatments effects on carbon and nitrogen stocks, in this way the mean stocks in 0-100 cm layer were 198.6 e 15.3 Mg ha⁻¹, respectively. On the other hand, when grazing was at 7 cm height, there were reductions in nitrogen lability, indicating that intensive grazing could reduce the quality of soil organic matter. Nitrogen fertilization did not affect carbon and nitrogen stocks in soil, however, the highest rate increased on average 19% carbon and nitrogen lability indices. In an integrated crop-livestock system, grazing at 15 cm height associated with nitrogen fertilization at a rate of 150 kg N ha⁻¹ during winter is efficient in maintaining carbon and nitrogen stocks and guaranteeing the quality of soil organic matter.

Keywords: Carbon sequestration. Conservationist agriculture. Grazing intensity. Physical fractionation. Mineralization.

3.3 INTRODUÇÃO

O acúmulo de carbono e nitrogênio no solo é definido pela relação entre entrada, pelos resíduos vegetais e dejetos dos animais, e pela saída através da decomposição da matéria orgânica do solo (MOS) (LAL, 2004). O carbono e o nitrogênio são os principais componentes da MOS e sua dinâmica é fortemente controlada pelos fatores relacionados ao manejo, pois este regula a atividade microbiana do solo (PLAZA et al., 2013) e interfere no desenvolvimento radicular das plantas (KÄTTERER et al., 2012). A elevação nos estoques de MOS no solo é uma estratégia interessante, pois, além de contrabalancear a emissão de gases de efeito estufa, aumenta a fertilidade, estrutura e estabilidade do solo, favorecendo a produtividade das culturas (LAL, 2015).

Estudando solos do sul do Brasil sob práticas conservacionistas Ferreira et al. (2018) concluem que a alta adição de resíduos culturais e o manejo da adubação são os principais responsáveis por elevarem os estoques de carbono no solo. Nesse sentido, o uso da integração lavoura-pecuária (ILP), constituída pelo cultivo de culturas de grãos e pastagens na mesma área ao longo do ano (CARVALHO et al., 2018), eleva o potencial de sequestro de carbono e nitrogênio no solo (ASSMANN et al., 2014; CECAGNO et al., 2018). Esses sistemas são caracterizados pela elevada quantidade de resíduos que retornam ao solo, sejam resíduos de parte aérea, ou de raízes das plantas ou ainda na forma de dejetos dos animais (SOUZA et al., 2008; CARVALHO et al., 2010). Porém, a intensidade de pastejo deve ser manejada com cuidado, visto que é o fator responsável pela quantidade de resíduo vegetal que estará sendo aportado ao solo, e consequentemente definirá a capacidade do sistema em sequestrar carbono da atmosfera (SILVA et al., 2014).

Os estoques de carbono vem sendo utilizados como indicadores da qualidade do solo em determinado sistema. Porém, por não ser uma variável sensível a curto prazo, quando não empregado um manejo agressivo (por exemplo o preparo convencional), os estoques totais de carbono por si só não evidenciam as alterações causadas pelo manejo (SOUZA et al., 2008). Dessa forma, estudos como o fracionamento físico granulométrico da matéria orgânica mostram-se promissores para o entendimento da dinâmica da MOS em solos agrícolas (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; CONCEIÇÃO et al., 2005).

Nesse sentido a fração particulada (MOP) da MOS é considerada a mais lábil, composta basicamente por resíduo vegetal é a mais sensível às práticas de manejo em curto prazo (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Dessa forma, uma maior quantidade de carbono na MOP indica que a MOS está fisicamente protegida pelos macroagregados do solo (DIECKOW et al., 2005), indicando um manejo adequado. Segundo Salton et al. (2005) maiores estoques de carbono na MOP garantem um fluxo positivo de carbono para o solo mantendo ou incrementando a atividade biológica e a qualidade do solo.

Dessa forma, a técnica do fracionamento físico poderá indicar os efeitos do manejo do pastejo sob a labilidade da MOS (BAYER et al., 2009). Avaliando um sistema de ILP com alturas de pastejo e após 9 anos de experimento Assmann et al. (2015), encontraram que o pastejo intensivo resultou em menor estoque de carbono e nitrogênio que o pastejo moderado e até mesmo o sem pastejo. Segundo os autores, os menores estoques de carbono na MOP indicam baixa produção no sistema pastejado à alta intensidade, evidenciando que esse sistema não é um manejo sustentável à longo prazo e causará degradação do solo.

Sendo assim a hipótese do presente estudo é de que o pastejo à altura de 15 cm (intensidade moderada), aliada ao aumento da dose de nitrogênio aplicada, em comparação à altura de 7 cm ou ao sem pastejo, irá incrementar o estoque na MOP e a labilidade do carbono e nitrogênio no solo. Dessa forma o objetivo foi avaliar o efeito da altura de pastejo e da dose de nitrogênio no estoque de carbono e nitrogênio no solo e na labilidade da MOS.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1 EXPERIMENTO DE CAMPO

O estudo foi realizado num experimento de campo na Fazenda Experimental do Campus Curitibanos da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no município de Curitibanos – SC (27°16'26.55" S, 50°30'14.41" W, 1000 m de altitude). O clima da região é subtropical (Cfb, Köppen) (ALVARES et al., 2013), com temperatura média de 11,6 °C no mês mais frio (julho) e 20,8 °C no mês mais quente (janeiro), e precipitação média anual de 1480 mm (WREGE et al., 2012). O solo do experimento foi classificado como Cambissolo Háplico Tb Distrófico

latossólico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018) (APÊNDICE 1).

A vegetação nativa do local foi floresta ombrófila mista a qual foi substituída por cultivo comercial de pinus (*Pinus* sp.) em 1980. Em 2009, o pinus foi colhido e a área permaneceu em pousio até 2013, quando o solo foi preparado com grade pesada para o cultivo agrícola. Nessa ocasião foi utilizada a sucessão braquiária (*Urochloa* sp.) e milho (*Zea mays* L.) no mesmo ano e a sucessão braquiária-soja (*Glycine max* L. Merrill) no ano seguinte. Em 2015, a área foi cultivada com tritcale (\times Triticosecale Wittm. ex A. Camus [*Secale* \times *Triticum*]) para pastejo durante o inverno, com a aplicação de 3,5 Mg ha⁻¹ calcário, e cultivo de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) no verão.

O experimento foi instalado em maio de 2016 em integração lavoura-pecuária, com aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) para pastagem em todos os invernos; e milho para grãos no verão do primeiro ano.

Os tratamentos foram constituídos de três alturas de pastejo da aveia preta (7 cm, 15 cm e sem pastejo) e três doses de nitrogênio aplicados em cobertura na aveia preta (0, 75 e 150 kg N ha⁻¹). A altura de pastejo de 7 cm simulou um pastejo intensivo, enquanto a altura de 15 cm simulou um pastejo moderado. O delineamento experimental foi fatorial 3 \times 3, em blocos ao acaso e com quatro repetições.

O pastejo da aveia preta foi realizado por bois ou novilhas predominantemente das raças Charolês e Holandês, e conduzido de forma rotacional, com o primeiro ciclo de pastejo iniciando 15-20 dias após adubação nitrogenada de cobertura, quando as plantas atingiam 30 cm de altura. Novo ciclo de pastejo iniciava quando a altura de plantas atingia novamente 30 cm e entre um ciclo e outro os animais permaneciam numa área de refúgio adjacente. Cada ciclo de pastejo durava 1-2 dias, com 4-6 animais por parcela, até as plantas serem rebaixadas à altura de 7 cm ou 15 cm, dependendo do tratamento. (Os detalhes de manejo da pastagem e da cultura de verão são os mesmos descritos no capítulo I).

3.4.2 ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO E SUA LABILIDADE

Os estoques de carbono e nitrogênio no solo foram avaliados ao final do pastejo da aveia preta em outubro de 2017, quando o experimento estava com 1,5

ano de duração. Foram amostrados dois pontos por parcela, por meio do método de escavação em trincheiras (BLAKE; HARTGE, 1986). As trincheiras foram escavadas nas dimensões laterais de 25 × 50 cm, abrangendo três linhas de aveia preta as camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm de profundidade. Todo o volume coletado em cada camada foi homogeneizado, pesado e uma alíquota de aproximadamente 200 g foi retirada para análises.

Com aproximadamente 20 g de solo foi realizada a determinação da umidade, através da secagem em estufa a 105°C até atingir massa constante. A densidade do solo (Mg m^{-3}), foi determinada corrigindo-se a massa total da camada para a massa de solo seco e multiplicando-se pelo volume da camada.

A determinação dos teores de carbono e nitrogênio foi realizada no restante do solo da alíquota. Primeiramente o solo foi seco ao ar e passado em peneira de 2mm (terra fina seca ao ar - TFSA). Cerca de 2 g de solo foram moídas em gral de porcelana e passadas em peneira de 250 μm , em que aproximadamente 40 mg de solo foram destinados à análise. Os teores de C e N foram determinados por combustão seca em analisador elementar Vario EL III

O estoque de C e N no solo foi calculado conforme proposto por Sisti et al. (2004), com correção pela massa equivalente do tratamento referência (Equação 1).

$$C = \sum_{i=1}^{n-1} C_i + \left[M_n - \left(\sum_{i=1}^n M_i - \sum_{i=1}^n M_{Ri} \right) \right] \left[\frac{C_n}{M_n} \right] \quad (\text{Eq 1})$$

Na equação, todas as variáveis são expressas em Mg ha^{-1} , onde:

$\sum_{i=1}^{n-1} C_i$ é a soma do estoque de C da primeira até a penúltima camada;

M_n é a massa de solo na camada mais profunda;

$\sum_{i=1}^n M_i$ é a soma da massa de solo da primeira até a camada mais profunda;

$\sum_{i=1}^n M_{Ri}$ é a soma da massa de solo da primeira até a camada mais

profunda, no tratamento referência; e

C_n é o estoque de C na camada mais profunda.

O sequestro de carbono e o acúmulo de nitrogênio no solo, em função do pastejo, foram determinados pela diferença de estoque entre o tratamento 15 cm ou 7 cm e o tratamento sem pastejo. O sequestro de carbono e o acúmulo de nitrogênio no solo, em função da dose de nitrogênio, foram determinados pela diferença de estoque entre o tratamento 75 ou 150 kg N ha⁻¹ e o tratamento sem adubação nitrogenada. Além disso os valores foram divididos pelo tempo de duração do experimento (1,5 anos), para determinar as taxas anuais.

Com as amostras das camadas 0-5 e 5-10 cm foi realizado o fracionamento físico granulométrico da MOS, conforme metodologia proposta por Cambardella e Elliott (1993). Primeiramente, em um frasco de 500 mL foram pesadas 20 g de solo (TFSA) e adicionado 70 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L⁻¹), além disso foram adicionadas 5 esferas de poliacetal por frasco, com a finalidade de ajudar na dispersão dos agregados maiores que 53 µm sem fragmentar a matéria orgânica particulada (MOP).

Após agitação por 16 horas a suspensão dos frascos foi passada em peneira de 53 µm. Com auxílio de água corrente a amostra foi lavada, separando a fração de tamanho areia + MOP do restante do material que passou pela peneira. A fração retida na peneira foi seca em estufa à 45° C até atingir massa constante. O material seco foi pesado e moído com auxílio de gral de porcelana até passagem em peneira de 250 µm, a qual foi utilizada para determinação de C e N total por combustão seca em analisador elementar Vario EL III.

Os estoques de C e N (Mg ha⁻¹) foram calculados pelo produto das porcentagens do elemento em cada fração pelo estoque acumulado corrigido do solo inteiro. Dessa forma a fração do material que foi retido na peneira de 53 µm corresponde a MOP, enquanto que o que passou pela peneira corresponde à matéria orgânica associada aos minerais (MOM). A MOM foi obtida através da diferença entre o estoque total de C (camada 0-5 e 5-10 cm) e o estoque na fração MOP.

Sendo assim, foram calculados os índices de labilidade (LI) (eq. 2) do C e N, conforme fórmula proposta por Wu e Xiao (2004) (Equação 2):

$$LI = \frac{L \text{ do tratamento}}{L \text{ da referencia}} \text{ (Eq. 2)}$$

Onde L refere-se à labilidade do C ou N, calculado pela equação 3:

$$L = \frac{C \text{ labil}}{C \text{ não labil}} \text{ (Eq. 3)}$$

Como C ou N lábil foi considerada a fração MOP e para o C ou N não lábil a MOM. O tratamento referência foi a área sem pastejo (lavoura) sem adição de nitrogênio.

3.4.3 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os dados de estoque de C e N no solo e nas frações da matéria orgânica, bem como sua relação C:N e taxas de sequestro de C e acúmulo de N e índices de labilidade foram submetidos à análise de normalidade (Shapiro-Wilk), homogeneidade das variâncias (Bartlett), e análise de variância (ANOVA). Quando constatado efeito significativo ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.5 RESULTADOS

3.5.1 ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO

Os estoques de carbono no solo não foram influenciados pelo pastejo no curto prazo de experimentação (1,5 anos) e foram em média 91,3 e 198,6 Mg C ha⁻¹ nas camadas de 0-30 e 0-100 cm, respectivamente (TABELA 1). Da mesma forma, não foram observados efeitos significativos nas concentrações de carbono, densidade do solo e taxas de sequestro de carbono no solo (TABELA 3). Também, os estoques de nitrogênio no solo não diferiram entre o pastejo à 15 cm e o sem pastejo, sendo em média 6,9 e 15,3 Mg N ha⁻¹ nas camadas de 0-30 e 0-100 cm, respectivamente (TABELA 2). Entre as alturas de pastejo de 15 cm e 7 cm também não houveram diferenças significativas nos estoques de carbono e nitrogênio, exceto na camada 0-30 cm e na dose de 150 kg N ha⁻¹, em que o pastejo à 7 cm resultou em maior estoque de nitrogênio no solo. Além disso, as taxas de acúmulo de nitrogênio foram superiores no pastejo à 7 cm (TABELA 3).

TABELA 1 – TEOR DE CARBONO DO SOLO (g kg^{-1}), DENSIDADE DO SOLO (Mg m^{-3}) E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO (Mg ha^{-1}) AO FINAL DO PASTEJO SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO ROTACIONAL (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 Kg N ha^{-1}).

Camada (cm)	Sem pastejo			15 cm			7 cm		
	0	75	150	0	75	150	0	75	150
<i>Teor de carbono do solo (g kg^{-1})</i>									
0-5	32,5	Aa	34,6	Aa	34,0	Aa	35,8	Aa	36,8
5-10	26,8	Aa	26,4	Aa	26,7	Aa	27,4	Aa	27,2
10-20	23,6	Aa	22,8	Aa	23,5	Aa	23,7	Aa	23,7
20-30	20,3	Aa	20,7	Aa	20,7	Aa	20,1	Aa	20,7
30-45	17,9	Aa	18,2	Aa	18,1	Aa	18,6	Aa	17,7
45-60	14,5	Aa	14,8	Aa	14,6	Aa	14,4	Aa	15,9
60-80	12,0	Aa	12,2	Aa	11,9	Aa	12,0	Aa	11,6
80-100	9,1	Aa	9,3	Aa	9,6	Aa	9,3	Aa	9,5
<i>Densidade do solo (Mg m^{-3})</i>									
0-5	1,09	Aa	1,07	Aa	1,05	Aa	0,98	Aa	1,02
5-10	1,28	Aa	1,32	Aa	1,30	Aa	1,24	Aa	1,26
10-20	1,29	Aa	1,25	Aa	1,21	Aa	1,28	Aa	1,22
20-30	1,25	Aa	1,15	Aa	1,21	Aa	1,23	Aa	1,21
30-45	1,13	Aa	1,13	Aa	1,14	Aa	1,18	Aa	1,22
45-60	1,20	Aa	1,20	Aa	1,22	Aa	1,18	Aa	1,24
60-80	1,20	Aa	1,15	Aa	1,16	Aa	1,15	Aa	1,15
80-100	1,20	Aa	1,18	Aa	1,16	Ab	1,31	Aa	1,18
<i>Estoque de carbono (Mg ha^{-1})</i>									
0-10	34,8	Aa	35,6	Aa	35,4	Aa	36,5	Aa	37,0
0-30	90,6	Aa	90,8	Aa	91,3	Aa	91,4	Aa	92,9
0-100	197,9	Aa	198,2	Aa	199,2	Aa	199,2	Aa	198,8

FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: Letras maiúsculas comparam as alturas de pastejo numa mesma dose de N, enquanto letras minúsculas comparam doses de N dentre da mesma altura de pastejo.

TABELA 2 – TEOR DE NITROGÊNIO DO SOLO (g kg⁻¹), RELAÇÃO CARBONO:NITROGÊNIO DO SOLO E ESTOQUE DE NITROGÊNIO DO SOLO (Mg ha⁻¹) AO FINAL DO PASTEJO SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO ROTACIONAL (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 Kg N ha⁻¹).

Camada (cm)	Sem pastejo			15 cm			7 cm		
	0	75	150	0	75	150	0	75	150
<i>Teor de nitrogênio do solo (g kg⁻¹)</i>									
0-5	2,68	Aa	2,80	Aa	2,89	Aa	2,66	Aa	2,75
5-10	2,14	Aa	2,05	Aa	2,10	Ba	2,03	Aa	2,10
10-20	1,74	Aa	1,72	Aa	1,73	Aa	1,73	Aa	1,72
20-30	1,46	Aa	1,44	Aa	1,49	Aa	1,44	Aa	1,50
30-45	1,26	Aa	1,32	Aa	1,23	Aa	1,27	Aab	1,42
45-60	1,07	Aa	1,08	Aa	1,02	Ba	1,10	Aa	1,09
60-80	0,97	Aa	0,97	Aa	0,88	Aa	0,97	Aab	1,05
80-100	0,90	Aa	0,87	Aa	0,88	Aa	0,83	Aa	0,81
<i>Relação C:N</i>									
0-5	12,12	Aa	12,34	Aa	12,27	Aa	12,56	Aa	12,42
5-10	12,14	Ba	12,90	Aa	12,83	Aa	13,16	Aa	12,67
10-20	13,18	Aa	13,31	Aa	13,67	Aa	13,43	Aa	13,66
20-30	13,96	Aa	13,92	Aa	13,84	Aa	14,13	Aa	14,10
30-45	14,04	Aa	13,83	Aa	14,48	Aa	14,24	Aa	12,91
45-60	13,51	Aa	13,67	Aa	13,89	Aa	13,32	Aa	13,13
60-80	12,30	Aa	12,60	Aa	13,25	Aa	12,90	Aa	11,87
80-100	9,64	Aa	10,83	Aa	11,27	Aa	11,35	Aa	11,38
<i>Estoque de nitrogênio (Mg ha⁻¹)</i>									
0-10	2,86	Aa	2,86	Aa	2,92	Aa	2,74	Aa	2,86
0-30	6,93	Aa	6,89	Aa	6,98	Ba	6,70	Aa	6,92
0-100	15,46	Aa	15,36	Aa	15,02	Aa	15,06	Aa	15,62

FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: Letras maiúsculas comparam as alturas de pastejo numa mesma dose de N, enquanto letras minúsculas comparam doses de N dentre da mesma altura de pastejo.

TABELA 3 – TAXA DE ACÚMULO DE CARBONO (Mg ha⁻¹ ano⁻¹) E TAXA DE ACÚMULO DE NITRÓGENO NO SOLO (Mg ha⁻¹ ano⁻¹) POR PASTEJO E POR NITRÓGENO APLICADO AO FINAL DO PASTEJO SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO ROTACIONAL (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITRÓGENO EM COBERTURA (0, 75, 150 Kg N ha⁻¹).

Camada (cm)	Acúmulo por pastejo ¹			Acúmulo por nitrogênio ²	
	15 cm	7 cm	75 kg N ha ⁻¹	150 kg N ha ⁻¹	
<i>Carbono (Mg ha⁻¹ ano⁻¹)</i>					
0-10 ^{ns}	0,07	0,63	0,57	0,98	
0-30 ^{ns}	0,20	0,78	0,33	0,64	
0-100 ^{ns}	0,70	0,27	0,35	0,32	
<i>Nitrogênio (Mg ha⁻¹ ano⁻¹)</i>					
0-10 [*]	-0,02	0,05	0,00	0,10	
0-30 [*]	-0,15	0,12	-0,04	0,11	
0-100 ^{ns}	-0,02	0,32	-0,05	-0,02	

FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: O teste de comparação de médias segue o mesmo para os respectivos estoques de carbono e nitrogênio nas camadas, onde ^{ns} refere-se à diferenças não significativas, enquanto * representa diferença significativa pelo teste de Tukey (p>0,05). ¹ o acúmulo de carbono e nitrogênio por pastejo foi calculado pela diferença entre a média dos estoques nas doses de N aplicadas do 15 cm ou 7 cm e a média do tratamento sem pastejo, dividindo-se pela duração do experimento de 1,5 ano. ² o acúmulo de carbono e nitrogênio por nitrogênio foi calculado pela diferença entre a média dos estoques nas alturas de pastejo do 75 e ou 150 kg N ha⁻¹ e a média do tratamento com ausência de adubação nitrogenada dividindo-se pela duração do experimento de 1,5 ano.

De maneira geral, também não houveram efeitos significativos da adubação nitrogenada para os estoques de carbono (TABELA 1) e nitrogênio (TABELA 2) no solo. Porém, na camada de 0-10 cm e no tratamento pastejado à 7 cm a maior dose resultou em aumento de 4% no estoque de carbono e 6% no de nitrogênio, em relação à ausência de adubação.

3.5.2 LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO

O pastejo à 15 cm não afetou a massa de matéria orgânica particulada (MOP), nem os estoques de carbono e nitrogênio na MOP e na matéria orgânica associada aos minerais (MOM), em relação ao sem pastejo (TABELAS 4 e 5). Dessa forma os estoques médios de carbono na MOP foram 3,3 e 1,1 Mg C ha⁻¹ e de nitrogênio foram 0,23 e 0,08 Mg N ha⁻¹, nas camadas 0-5 e 5-10 cm, respectivamente. Similarmente, o índice de labilidade de carbono (ILC) e o índice de labilidade de nitrogênio (ILN) não foram significativamente afetados pelo pastejo. Exceção ocorreu no pastejo à 15 cm e dose de 75 kg N ha⁻¹, onde houve ILC 29% maior ao sem pastejo na camada 0-5 cm.

Por outro lado, ao comparar as duas alturas de pastejo, 15 cm apresentou maiores ILC em duas ocasiões, na dose de 75 kg N ha⁻¹ na camada 0-5 cm e na ausência de adubação, na camada 5-10 cm, portanto não evidenciando um efeito claro. Porém, o ILN apresentou um comportamento constante, em todas as doses avaliadas e na camada de 5-10 cm o pastejo à 7 cm resultou em menores índices.

A maior dose de nitrogênio aplicada aumentou o ILC na camada 0-5 cm (TABELA 4) e o ILN na camada 5-10 cm (TABELA 5) em todos os sistemas avaliados. Assim o incremento no ILC em comparação à ausência de adubação foi de 11 a 26%, enquanto que no ILN foi de 18 a 23%. Além disso a adubação nitrogenada elevou a massa da MOP e o ILN na camada 0-5 cm no tratamento sem pastejo.

TABELA 4 – FRACIONAMENTO FÍSICO GRANULOMÉTRICO DO CARBONO E SUA LABILIDADE AO FINAL DO PASTEJO SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO ROTACIONAL (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 Kg N ha⁻¹).

Camada (cm)	Sem pastejo			15 cm			7 cm		
	0	75	150	0	75	150	0	75	150
<i>Massa da areia+MOP (% do solo)</i>									
0-5	10,99	Ab	11,32	Aab	12,24	Aa	11,96	Aa	11,98
5-10	8,79	Aa	8,68	Aa	8,75	Aa	8,80	Aa	9,95
<i>Teor de C (g kg⁻¹) na areia+MOP</i>									
0-5	45,18	Ab	49,03	ABab	52,55	Aa	48,37	Ab	55,44
5-10	18,25	Aa	19,06	Aa	21,51	Aa	16,66	Ab	21,69
<i>Estoque de C na areia+MOP (Mg ha⁻¹)</i>									
0-5	2,68	Ab	3,05	Aab	3,53	Aa	3,11	Ab	3,71
5-10	1,03	Aa	1,06	Aa	1,18	Aa	0,98	Aa	1,38
<i>Estoque de C na MOM (Mg ha⁻¹)</i>									
0-5	14,98	Aa	15,74	Aa	15,71	Aa	14,98	Aa	14,78
5-10	16,12	Aa	15,75	Aa	15,74	Aa	15,88	Aa	15,55
<i>Labilidade de C</i>									
0-5	0,18	Ab	0,19	Bb	0,23	Aa	0,21	Aa	0,25
5-10	0,06	Aa	0,07	Aa	0,08	Aa	0,06	Aa	0,09
<i>Índice de labilidade de C</i>									
0-5	1,00	Ab	1,09	Bb	1,26	Aa	1,16	Ab	1,41
5-10	1,00	Aa	1,09	Aa	1,19	Aa	0,98	Aa	1,43

FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: Letras maiúsculas comparam as alturas de pastejo numa mesma dose de N, enquanto letras minúsculas comparam doses de N dentre da mesma altura de pastejo. Labilidade do C= C da MOP/C da MOM; Índice de labilidade = labilidade do C do tratamento / labilidade do C do tratamento referência (sem pastejo com 0 kg N ha⁻¹).

TABELA 5 – FRACIONAMENTO FÍSICO GRANULOMÉTRICO DO NITROGÊNIO E SUA LABILIDADE AO FINAL DO PASTEJO SOB TRÊS ALTURAS DE PASTEJO ROTACIONAL (SEM PASTEJO, 15 cm, 7 cm) E TRÊS DOSES DE NITROGÊNIO EM COBERTURA (0, 75, 150 Kg N ha⁻¹).

Camada (cm)	Sem pastejo			15 cm			7 cm		
	0	75	150	0	75	150	0	75	150
<i>Teor de N (g kg⁻¹) na areia+MOP</i>									
0-5	3,15	Ab	3,35	Aab	3,80	Aa	3,57	Aa	3,71
5-10	1,28	Aa	1,33	Aa	1,46	Aa	1,14	Ab	1,50
<i>Estoque de N na areia+MOP (Mg ha⁻¹)</i>									
0-5	0,19	Ab	0,20	Ab	0,25	Aa	0,23	Aa	0,25
5-10	0,07	Aa	0,08	Aa	0,08	Aa	0,07	Aa	0,10
<i>Estoque de N na MOM (Mg ha⁻¹)</i>									
0-5	1,27	Aa	1,32	Aa	1,32	Aa	1,21	Aa	1,24
5-10	1,33	Aa	1,26	Aa	1,27	Aa	1,23	Aa	1,27
<i>Labilidade de N</i>									
0-5	0,15	Ab	0,16	Ab	0,19	Aa	0,19	Aa	0,21
5-10	0,06	Aa	0,06	Aa	0,06	Aa	0,06	Aa	0,08
<i>Índice de labilidade de N</i>									
0-5	1,00	Aab	10,6	Ab	1,29	Aa	1,29	Aa	1,42
5-10	1,00	Ab	1,12	ABab	1,18	ABa	1,03	Ab	1,39
<i>Relação C:N da areia+MOP</i>									
0-5	14,36	Aa	14,64	Aa	13,85	Aa	13,60	Aa	14,97
5-10	14,27	Aa	14,34	Aa	14,74	Aa	14,58	Aa	14,40
<i>Relação C:N da MOM</i>									
0-5	11,80	Aa	11,95	Ba	11,92	Aa	12,38	Aa	11,97
5-10	12,20	Aa	12,56	Aa	12,45	Aa	12,96	Aa	12,27

FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: Letras maiúsculas comparam as alturas de pastejo numa mesma dose de N, enquanto letras minúsculas comparam doses de N dentro da mesma altura de pastejo. Labilidade do N = N da MOP / N da MOM; Índice de labilidade = labilidade do N do tratamento / labilidade do N do tratamento referência (sem pastejo com 0 kg N ha⁻¹)

3.6 DISCUSSÃO

3.6.1 EFEITO DO PASTEJO NOS ESTOQUES E LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO

O fato de não haverem diferenças significativas entre os sistemas avaliados para os estoques de carbono (TABELA 2) e nitrogênio (TABELA 3) no solo pode ser atribuído à curta duração do experimento, que possuía somente 1,5 anos no momento da amostragem. Segundo Lehmann e Kleber (2015), a dinâmica dos resíduos de planta no solo é dependente de fatores responsáveis pela decomposição, através dos organismos edáficos e consequente transformações em matéria orgânica do solo. Tais processos ocorrem lentamente no solo, sendo assim necessário vários anos para que sejam observadas variações significativas nos estoques.

Em condições com favorável adição de resíduos, acima do previsto para manter os estoques de carbono iniciais e após 13 anos de condução de um sistema ILP com alturas de pastejo, Cecagno et al. (2018) também não encontraram diferenças significativas para o estoque na camada 0-20 cm corroborando com o encontrado no presente estudo. Segundo os autores, no pastejo intensivo (10 cm) a menor quantidade de biomassa produzida pela parte aérea em comparação ao pastejo de intensidade moderada e leve (20, 30 e 40 cm) foi compensada por maior produção de raízes, isso aliado à maior entrada de esterco, dessa forma mantendo os estoques similares entre os tratamentos. Apesar disso, os autores estimam a longo prazo (>50 anos) que os estoques de carbono nos sistemas pastejados à 10 cm terão um potencial de acúmulo reduzido em 20 Mg ha^{-1} , na camada 0-20 cm.

Além disso, considerando o período de dois invernos de pastejo e um verão com cultivo do milho, a adição média de carbono ao sistema foi de $6,7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Ver capítulo I), valor esse muito superior ao proposto por Bayer et al. (2006), no qual em regiões subtropicais devem ser adicionados $3,92 \pm 1,30 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ somente para manter os estoques iniciais. Nessa condição a elevada proporção do carbono proveniente da cultura milho (77%) pode ter suprimido eventuais efeitos da adição pelo pastejo nos estoques de carbono e nitrogênio do solo.

Conforme já discutido anteriormente, a eleva quantidade de resíduo de milho também pode ter resultado na ausência de efeitos do pastejo nos estoques de

carbono (TABELA 4) e nitrogênio (TABELA 5) na fração particulada da matéria orgânica. De acordo com Assmann et al. (2014), quando a entrada de resíduos lábeis ao solo é insuficiente, a sustentabilidade do sistema será comprometida, levando à perdas nos estoques de carbono. Tal fato pode estar relacionado aos baixos índices de labilidade do nitrogênio no pastejo à 7 cm, devido a menor adição de nitrogênio durante o período de inverno (Ver capítulo 1)

Em estudo com pastagens perenes conduzido por Sun et al. (2017), o pastejo intenso estimulou a liberação de carbono derivado das raízes para o solo e favoreceu liberação de enzimas microbianas responsáveis pela quebra de compostos nitrogenados. Tais resultados sugerem que um aumento na exsudação radicular estimula a atividade microbiana e acelera a ciclagem do nitrogênio (MEIER et al., 2017; SUN et al., 2017). Além disso, de acordo com Han et al. (2008), em sistemas pastejados à altas intensidades a ciclagem do nitrogênio é mais rápida, principalmente pelo fato de que o nitrogênio excretado pelos animais. Sendo assim podemos inferir que uma maior quantidade de nitrogênio, devido à maior taxa de mineralização, tenha sido rapidamente transformada, dessa forma diminuindo sua proporção na fração particulada da MOS, consequentemente reduzindo sua labilidade no tratamento pastejado à 7 cm de altura (TABELA 5).

3.6.2 EFEITOS DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NOS ESTOQUES E LABILIDADE DE CARBONO E NITROGÊNIO

Os efeitos não significativos da adubação nitrogenada nos estoques de carbono (TABELA 2) e nitrogênio (TABELA 3) do solo, assim como a falta de efeitos do pastejo, se relacionam ao curto tempo de duração do experimento (< 2 anos) (CARVALHO et al., 2010), ainda que mostrem tendência em aumentar as taxas de acúmulo desses elementos com aumento da dose aplicada (TABELA 4). Estudos de longo prazo mostram que a maior adição de resíduos promovida pela adubação nitrogenada (GAI et al., 2018; VELOSO et al., 2018) aliada ao uso de diversificação de culturas em plantio direto (CONCEIÇÃO et al., 2013; ALBURQUERQUE et al., 2015) levarão a aumentos nos estoques de carbono no solo.

Nos estoques de carbono na MOP já é possível observar efeito significativo da adubação nitrogenada em todos os sistemas (camada 0-5 cm) (TABELA 4). Tal comportamento pode ser principalmente atribuído à maior adição de carbono pela

aveia preta proporcionada pela adubação nitrogenada (Ver capítulo 1). O mesmo comportamento foi observado por Franzluebbbers e Stuedemann (2002), segundo os autores o principal motivo relacionado aos incrementos no carbono da MOP se relaciona à maior produção de biomassa das culturas quando receberam fertilização.

Além disso, o aumento na labilidade do carbono e nitrogênio pode estar relacionado tanto à maior adição de resíduos quanto à adição de resíduos de maior qualidade (COTRUFO et al., 2013). Nesse sentido, a menor relação C:N dos resíduos de parte aérea e radicular quando houve adubação nitrogenada (Ver capítulo 1), podem ter aumentado a labilidade da matéria orgânica. Tais resultados vão ao encontro de Poeplau et al. (2018), em que a fertilização em pastagem reduziu a relação C:N das raízes, resultando em maior eficácia do uso de carbono pelos microrganismos do solo, incrementando os estoques de carbono no solo à longo prazo.

3.7 CONCLUSÕES

Nas condições do sistema de integração lavoura-pecuária e curta duração de experimento, o pastejo moderado da aveia preta à 15 cm de altura, em comparação ao sem pastejo, não altera os estoques de carbono e nitrogênio no solo nem modifica de forma conclusiva seu índice de labilidade. Quando o pastejo foi intensivo, conduzido à 7 cm de altura não houve alterações nos estoques de carbono e nitrogênio, porém sinaliza redução na labilidade do nitrogênio.

A adubação nitrogenada no inverno, a curto prazo, não afeta os estoques totais de carbono e nitrogênio no solo, porém aumenta seus índices de labilidade. Além disso, a adubação nitrogenada incrementa os estoques de carbono na matéria orgânica particulada tanto nos sistemas pastejados como no sem pastejo.

3.8 REFERÊNCIAS

ALBURQUERQUE, M. A. et al. Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. **Soil Use and Management**, Hoboken, v. 31, n. 1, p. 1-9, 2015.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ASSMANN, J. M. et al. Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 10, p. 967-978, 2015.

ASSMANN, J. M. et al. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 190, n. Supplement C, p. 52-59, 2014.

BAYER, C. et al. Cover Crop Effects Increasing Carbon Storage in a Subtropical No-Till Sandy Acrisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Londres, v. 40, n. 9-10, p. 1499-1511, 2009.

BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 91, n. 1, p. 217-226, 2006.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods**. Madison, WI: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 777-783, 1992.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, Amsterdã, v. 56, p. 449-457, 1993.

CARVALHO, P. C. D. F. et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 88, n. 2, p. 259-273, 2010.

CARVALHO, P. D. F. et al. Integrating the pastoral component in agricultural systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 47, 2018.

CECAGNO, D. et al. Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 3, p. e553, 2018.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 777-788, 2005.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 129, n. Supplement C, p. 40-47, 2013.

COTRUFO, M. F. et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, Hoboken, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013.

DIEKOW, J. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, Amsterdã, v. 268, n. 1-2, p. 319-328, 2005.

FERREIRA, A. O. et al. Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil. **Science of The Total Environment**, Amsterdã, v. 622–623, p. 735-742, 2018.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. **Environmental Pollution**, Amsterdã, v. 116, n. Supplement 1, p. S53-S62, 2002.

GAI, X. P. et al. Long-term benefits of combining chemical fertilizer and manure applications on crop yields and soil carbon and nitrogen stocks in North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v. 208, p. 384-392, 2018.

HAN, G. et al. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 125, n. 1-4, p. 21-32, 2008.

KÄTTERER, T. et al. Strategies for carbon sequestration in agricultural soils in northern Europe. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science**, Londres, v. 62, n. 4, p. 181-198, 2012.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdã, v. 123, p. 22, 2004.

LAL, R. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny v. 70, n. 3, p. 55A-62A, 2015.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, Londres, v. 528, p. 60, 2015.

MEIER, I. C.; FINZI, A. C.; PHILLIPS, R. P. Root exudates increase N availability by stimulating microbial turnover of fast-cycling N pools. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdã, v. 106, n. Supplement C, p. 119-128, 2017.

PLAZA, C. et al. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdã, v. 57, p. 124-134, 2013.

POEPLAU, C. et al. Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 265, p. 144-155, 2018.

SALTON, J. C. et al. **Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Dourados, MS. 2005

SANTOS, H. G. D. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018.

SILVA, F. D. D. et al. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 190, p. 60-69, 2014.

SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOUZA, E. D. D. et al. Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistema de integração agricultura-pecuária submetido a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1273-1282, 2008.

SUN, G. et al. Responses of root exudation and nutrient cycling to grazing intensities and recovery practices in an alpine meadow: An implication for pasture management. **Plant and Soil**, Amsterdã, v. 416, n. 1-2, p. 515-525, 2017.

VELOSO, M. G. et al. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 268, p. 15-23, 2018.

WREGE, M. S. et al. **Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2. Brasília: Embrapa, 2012.

WU, J.; XIAO, H. Measuring the gross turnover time of soil microbial biomass C under incubation. **Acta Pedologica Sinica**, Nanjing, v. 41, n. 3, p. 401-407, 2004.

4 CONCLUSÃO GERAL

O pastejo à 15 cm mantém as adições de carbono e nitrogênio pelas raízes da pastagem, evidenciando que essa pratica é interessante em preservar o principal mecanismo de entrada de matéria orgânica no solo. Com adubação nitrogenada a adição de carbono e nitrogênio pela parte aérea da pastagem é incrementada sem afetar raízes, o que torna essa prática útil do ponto de vista de melhorar a cobertura do solo e elevar a adição total de planta.

Ao considerar a adição anual total de carbono pelo sistema, não há efeito do pastejo, resultando em valores acima do recomendado para manter os estoques iniciais no solo. Dessa forma, na condição de elevada adição de resíduos pelo sistema de integração lavoura-pecuária, o manejo no período do pastejo não afeta os estoques de carbono e nitrogênio do solo a curto prazo. Porém, quando o pastejo é conduzido à 7 cm de altura, há reduções nos índices de labilidade da matéria orgânica do solo, indicando que esse sistema não será capaz de manter a qualidade da matéria orgânica a longo prazo.

Vale salientar algumas peculiaridades referentes ao experimento que podem ter refletido nos presentes resultados. A forma de pastejo é conduzida de forma rotacional e é feito por bovinos na categoria animal de terneiros e novilhas, fato esse que acarreta em baixo peso vivo eventualmente não resultando em efeitos de compactação no solo. Além disso, a quantidade de esterco excretada por esses animais pode ter sido de menor proporção ao estimado no estudo, resultando em menores adições que as previstas. Outro ponto relevante são as condições do solo e de manejo que são empregados no estudo, pois com a baixa declividade, o cultivo de culturas em nível e a rotação de culturas de verão proporcionam uma condição desfavorável à perda de solo por erosão e favorável ao acúmulo de MOS.

Sendo assim, a recomendação desse estudo é de manter o pastejo à 15 cm de altura e aplicar nitrogênio na dose de 150 kg N ha⁻¹, associado à rotação de culturas de grãos no verão. Dessa forma, o sistema de integração lavoura-pecuária será uma prática de manejo que garantirá qualidade do solo e a sustentabilidade na agropecuária na região Sul do Brasil.

5 REFERÊNCIAS

ALBURQUERQUE, M. A. et al. Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. **Soil Use and Management**, Hoboken, v. 31, n. 1, p. 1-9, 2015.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

AMADO, T. J. C. et al. Potential of Carbon Accumulation in No-Till Soils with Intensive Use and Cover Crops in Southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 35, n. 4, p. 1599-1607, 2006.

ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. D. F.; COSTA, S. E. V. G. D. A. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropico brasileiro. In: (Ed.). **Tópicos em Ciência do solo**: Sociedade brasileira de Ciência do Solo, 2013. p. 325-380.

ASSMANN, J. M. et al. Carbon and nitrogen cycling in an integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 10, p. 967-978, 2015.

ASSMANN, J. M. et al. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop–livestock system under no-tillage in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 190, n. Supplement C, p. 52-59, 2014.

BAYER, C. et al. Cover Crop Effects Increasing Carbon Storage in a Subtropical No-Till Sandy Acrisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Londres, v. 40, n. 9-10, p. 1499-1511, 2009.

BAYER, C. et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 91, n. 1, p. 217-226, 2006.

BAYER, C. et al. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdã, v. 133, n. 3-4, p. 258-268, 2006.

BIELUCZYK, W. et al. Soil carbon and nitrogen stocks, light organic matter, and remaining phosphorus under a crop-livestock integration system. **Semina-Ciencias Agrarias**, Londrina, v. 38, n. 4, p. 1825-1840, 2017.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods**. Madison, WI: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, 1986. p. 363-375.

BOLINDER, M. A. et al. An approach for estimating net primary productivity and annual carbon inputs to soil for common agricultural crops in Canada. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 118, n. 1-4, p. 29-42, 2007.

BOLINDER, M. A. et al. Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. **Canadian Journal of Soil Science**, Alberta, v. 92, n. 6, p. 821-833, 2012.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 777-783, 1992.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, Amsterdã, v. 56, p. 449-457, 1993.

CARVALHO, P. C. D. F. et al. Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Amsterdã, v. 88, n. 2, p. 259-273, 2010.

CARVALHO, P. D. F. et al. Integrating the pastoral component in agricultural systems. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 47, 2018.

CECAGNO, D. et al. Least limiting water range and soybean yield in a long-term, no-till, integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 156, p. 54-62, 2016.

CECAGNO, D. et al. Soil organic carbon in an integrated crop-livestock system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 13, n. 3, p. e553, 2018.

CHEN, W. et al. Improved grazing management may increase soil carbon sequestration in temperate steppe. **Scientific Reports**, Londres, v. 5, p. 10892, 2015.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 777-788, 2005.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 129, n. Supplement C, p. 40-47, 2013.

CONTE, O. et al. Evolução de atributos físicos de solo em sistema de integração lavourapecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1301-1309, 2011.

COTRUFO, M. F. et al. The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? **Global Change Biology**, Hoboken, v. 19, n. 4, p. 988-995, 2013.

DIEKOW, J. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. **Plant and Soil**, Amsterdã, v. 268, n. 1-2, p. 319-328, 2005.

DIGNAC, M.-F. et al. Increasing soil carbon storage: mechanisms, effects of agricultural practices and proxies. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Heidelberg, v. 37, n. 2, p. 14, 2017.

FERREIRA, A. O. et al. Driving factors of soil carbon accumulation in Oxisols in long-term no-till systems of South Brazil. **Science of The Total Environment**, Amsterdã, v. 622–623, p. 735-742, 2018.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Particulate and non-particulate fractions of soil organic carbon under pastures in the Southern Piedmont USA. **Environmental Pollution**, Amsterdã, v. 116, n. Supplement 1, p. S53-S62, 2002.

FUKUSHIMA, R. S. et al. Comparison of acetyl bromide lignin with acid detergent lignin and Klason lignin and correlation with in vitro forage degradability. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdã, v. 201, n. Supplement C, p. 25-37, 2015.

FULKERSON, W. J.; DONAGHY, D. J. Plant-soluble carbohydrate reserves and senescence - key criteria for developing an effective grazing management system for ryegrass-based pastures: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Melbourne, v. 41, n. 2, p. 261-275, 2001.

GAI, X. P. et al. Long-term benefits of combining chemical fertilizer and manure applications on crop yields and soil carbon and nitrogen stocks in North China Plain. **Agricultural Water Management**, Amsterdã, v. 208, p. 384-392, 2018.

GONG, X. Y. et al. Response of primary production and biomass allocation to nitrogen and water supplementation along a grazing intensity gradient in semiarid grassland. **European Journal of Agronomy**, Amsterdã, v. 63, p. 27-35, 2015.

GREGORY, P. J. **Plant roots : their growth, activity, and interaction with soils**. Blackwell Publishing Ltd, 2006.

HAN, G. et al. Effect of grazing intensity on carbon and nitrogen in soil and vegetation in a meadow steppe in Inner Mongolia. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 125, n. 1-4, p. 21-32, 2008.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

KÄTTERER, T. et al. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 141, n. 1, p. 184-192, 2011.

KÄTTERER, T. et al. Strategies for carbon sequestration in agricultural soils in northern Europe. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science**, Londres, v. 62, n. 4, p. 181-198, 2012.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdã, v. 123, p. 22, 2004.

LAL, R. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 70, n. 3, p. 55A-62A, 2015.

LAL, R. et al. Management to mitigate and adapt to climate change. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 66, n. 4, p. 276-285, 2011.

LAL, R. et al. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. **Soil Science**, Alberta, v. 172, n. 12, p. 943-956, 2007.

LARREGUY, C.; CARRERA, A. L.; BERTILLER, M. B. Reductions of plant cover induced by sheep grazing change the above-belowground partition and chemistry of organic C stocks in arid rangelands of Patagonian Monte, Argentina. **Journal of Environmental Management**, Amsterdã, v. 199, p. 139-147, 2017.

LEHMANN, J.; KLEBER, M. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, Londres, v. 528, p. 60, 2015.

LONG, R. J. et al. Digestibility, nutrient balance and urinary purine derivative excretion in dry yak cows fed oat hay at different levels of intake. **Livestock Production Science**, Amsterdã, v. 88, n. 1, p. 27-32, 2004.

LYNCH, J. P. Rightsizing Root Phenotypes for Drought resistance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 69, n. 13, p. 3279-3292, 2018.

MEIER, I. C.; FINZI, A. C.; PHILLIPS, R. P. Root exudates increase N availability by stimulating microbial turnover of fast-cycling N pools. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdã, v. 106, n. Supplement C, p. 119-128, 2017.

MIGUEL, M. F. et al. Pasture characteristics of Italian ryegrass and milk production under different management strategies. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 863-868, 2012.

NICOLOSO, R. D. S. et al. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2425-2433, 2008.

NUNES, P. A. D. A. et al. Grazing intensity determines pasture spatial heterogeneity and productivity in an integrated crop-livestock system. **Grassland Science**, Hoboken, 2018.

PAUSCH, J.; KUZYAKOV, Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. **Global change biology**, Hoboken, v. 24, n. 1, p. 1-12, 2017.

PIERRI, L. D. et al. Sazonalidade e potencial energético da biomassa residual agrícola na região dos Campos Gerais do Paraná. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 63, p. 129-137, 2016.

PLAZA, C. et al. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdã, v. 57, p. 124-134, 2013.

POEPLAU, C. et al. Qualitative and quantitative response of soil organic carbon to 40 years of crop residue incorporation under contrasting nitrogen fertilisation regimes. **Soil Research**, Melbourne, v. 55, p. 1-9, 2016.

POEPLAU, C. et al. Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, amsterdã, v. 265, p. 144-155, 2018.

POORTER, H. et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: meta-analyses of interspecific variation and environmental control. **New Phytologist**, Hoboken, v. 193, n. 1, p. 30-50, 2012.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M.-F. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. **Plant and Soil**, Amsterdã, v. 269, n. 1, p. 341-356, 2005.

SALTON, J. C. et al. **Matéria orgânica do solo na integração lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul**. Dourados, MS. 2005

SANTOS, H. G. D. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2018.

SANTOS, N. Z. D. et al. Forages, cover crops and related shoot and root additions in no-till rotations to C sequestration in a subtropical Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 111, n. 2, p. 208-218, 2011.

SCHIPPER, L. A. et al. A review of soil carbon change in New Zealand's grazed grasslands. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Lincoln, v. 60, n. 2, p. 93-118, 2017.

SCHUURMAN, J. J.; GOEDEWAAGEN, M. A. J. **Methods for the examination of root systems and roots**. Wageningen: Centre for Agricultural Publications and Documentation, 1971.

SILVA, F. D. D. et al. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 190, p. 60-69, 2014.

SILVEIRA, E. R. et al. Intensidade de pastejo e adubação nitrogenada na massa seca de aveia e produtividade do milho na integração lavoura-pecuária. **Semina-Ciencias Agrarias**, Londrina, v. 33, n. 4, p. 1323-1331, 2012.

SISTI, C. P. J. et al. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 76, n. 1, p. 39-58, 2004.

SOKOL, N. W.; SANDERMAN, J.; BRADFORD, M. A. Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point-of-entry. **Global Change Biology**, Hoboken, 2018.

SOUZA, E. D. D. et al. Carbono orgânico e fósforo microbiano em sistema de integração agricultura-pecuária submetido a diferentes intensidades de pastejo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1273-1282, 2008.

STERGIADIS, S. et al. Equations to predict methane emissions from cows fed at maintenance energy level in pasture-based systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 220, p. 8-20, 2016.

SUN, G. et al. Responses of root exudation and nutrient cycling to grazing intensities and recovery practices in an alpine meadow: An implication for pasture management. **Plant and Soil**, Amsterdã, v. 416, n. 1-2, p. 515-525, 2017.

TIVET, F. et al. Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma**, Amsterdã, v. 209-210, p. 214-225, 2013.

VELOSO, M. G. et al. High carbon storage in a previously degraded subtropical soil under no-tillage with legume cover crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdã, v. 268, p. 15-23, 2018.

WREGE, M. S. et al. **Atlas climático da região Sul do Brasil: estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. 2. Brasília: Embrapa, 2012.

WU, J.; XIAO, H. Measuring the gross turnover time of soil microbial biomass C under incubation. **Acta Pedologica Sinica**, Nanjing, v. 41, n. 3, p. 401-407, 2004.

WU, Z. T. et al. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 17, n. 2, p. 927-942, 2011.

ZANATTA, J. A. et al. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil and Tillage Research**, Amsterdã, v. 94, n. 2, p. 510-519, 2007.

ZHOU, G. et al. Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 23, n. 3, p. 1167-1179, 2017.

APÊNDICE 1 –CLASSIFICAÇÃO DO SOLO DA ÁREA EXPERIMENTAL.

APÊNDICE 1 - Características químicas, físicas e morfológicas do perfil usado para classificação do solo da área.

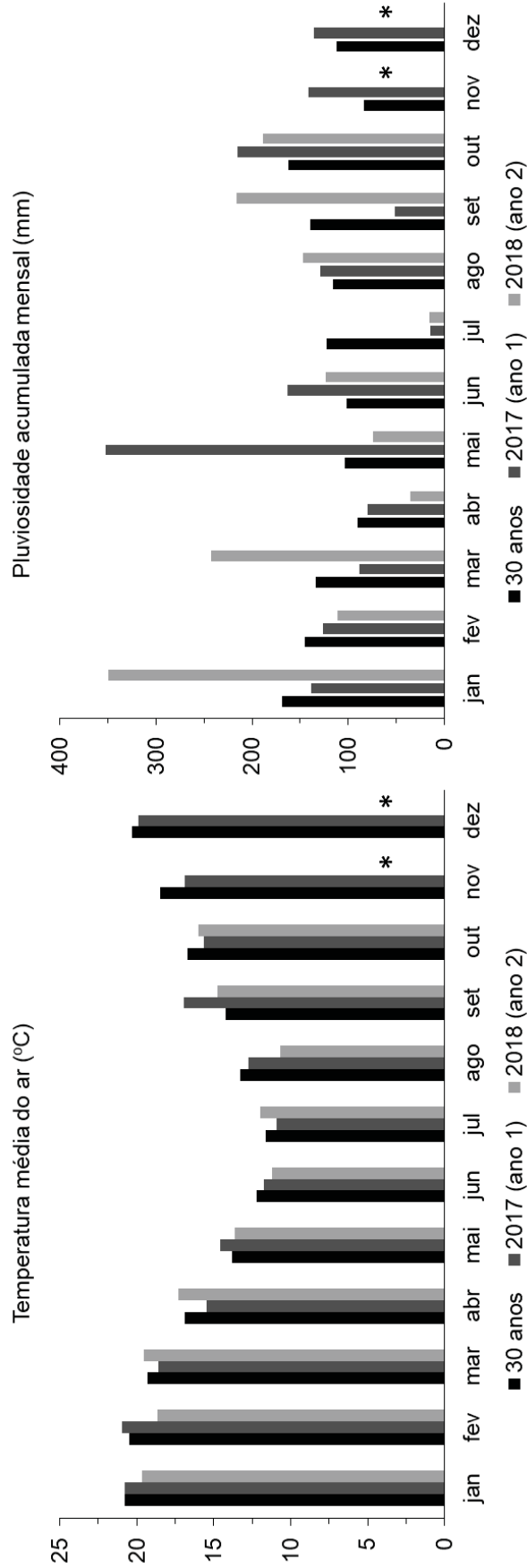
Horizonte	Camada cm	pH CaCl ₂	pH SMP	Al ^b	H+Al	Ca ^b	Mg ^b	K ^c	SB	t	T	V	m	P ^c	C ^d
							cmol _c dm ⁻³					%		mg dm ⁻³	g dm ⁻³
A	0-13	4,75	5,49	0,30	7,83	3,70	2,50	0,14	6,34	6,64	14,18	44,75	4,52	9,10	33,80
AB	13-26	5,02	5,74	0,15	5,88	3,30	3,00	0,10	6,40	6,55	12,27	52,12	2,29	3,60	20,10
B	26-77	4,16	4,92	2,60	15,07	0,70	1,40	0,08	2,18	4,78	17,26	12,66	54,34	1,50	13,40
BC	77-88	4,16	4,90	2,45	15,42	0,40	1,10	0,08	1,58	4,03	17,00	9,30	60,77	3,50	6,90
C	88-150	4,28	5,53	1,20	7,48	0,10	0,60	0,08	0,78	1,98	8,26	9,41	60,71	3,60	0,60
Continuação															
Horizonte	Cor	Estrutura				Argila ^a	Silte ^a	Areia ^a	Atividade da argila				Grupamento textural		
						g dm ⁻³			cmol _c dm ⁻³						
A	7,5 yr 3/2	Bloco subangular - moderado				650	213	138	21,8				Muito argiloso		
AB	7,5 yr 3/3	Bloco subangular - moderado a fraco				688	213	100	17,8				Muito argiloso		
B	10 yr 3/3	Bloco subangular e granular - fraco				750	175	75	23,0				Muito argiloso		
BC	2,5 yr 3/3	Granular fraca				725	200	75	23,5				Muito argiloso		
C	2,5 yr 5/4	Granular fraca				700	213	88	23,5				Muito argiloso		

FONTE: O autor (2018).

LEGENDA: ^a Granulometria realizada por metodologia de densímetro de Bouyoucos.; ^b Extrator KCl (1,0 mol L⁻¹); ^c Extrator melich-1; ^d Oxidação por dicromato de potássio e ácido sulfúrico.

APÊNDICE 2 - NORMAIS CLIMATOLÓGICAS DE CURITIBANOS-SC.

APÊNDICE 2 - Normais climatológicas (30 anos) e dados de 2017 e 2018, para temperatura média do ar e pluviosidade acumulada mensais do município de Curitiba-SC.



FONTE: Normais climatológicas para o município de Curitiba obtidas de Wrege et al. (2012) e dados de 2017 e 2018 obtidos a partir da estação meteorológica próxima ao experimento.

LEGENDA: * os dados de temperatura e pluviosidade para os meses de novembro e dezembro de 2018 não foram obtidos.